



**João Miguel Branco Serra**

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

**Estudo de durabilidade de uma caixa  
redutora de fabrico em estrutura  
soldada**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Teresa Leonor Ribeiro  
Cardoso Martins Morgado, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado  
Arguente: Professor Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva  
Vogal: Professora Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro de 2018**



Estudo de durabilidade de uma caixa redutora de fabrico em estrutura soldada

Copyright © João Miguel Branco Serra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





*Aos meus pais.*



## **Agradecimentos**

À minha orientadora, Professora Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado, pela oportunidade de realizar esta dissertação, pela orientação, por toda a disponibilidade para esclarecer dúvidas, e por todo o apoio e motivação concedidos ao longo do trabalho realizado.

Ao Instituto Superior Técnico no âmbito da simulação numérica.

Aos meus colegas Ricardo Paulo, Tiago Álvares e Filipa Monteiro pelo apoio e motivação ao longo deste trabalho e ao longo de todo o curso, e pela amizade construída ao longo destes anos.

À Catarina pela motivação e preocupação demonstrada, pelos conselhos dados, e pelo apoio incondicional que me propulsionou sempre ao longo desta dissertação.

Aos meus pais e ao meu irmão, por todo o esforço, pelos conselhos e num geral por todo o apoio que me deram ao longo desta dissertação e ao longo do curso.

Por fim, queria ainda agradecer a todos aqueles com quem me cruzei ao longo do curso, mesmo que não tenha referido, e que de algum modo me ajudaram ou motivaram para a realização da presente dissertação.



## Resumo

A presente dissertação consiste em estabelecer uma metodologia para determinação da durabilidade de um componente ferroviário. O componente estudado é a caixa redutora de uma locomotiva que falhou prematuramente devido ao fenómeno de fadiga. Esta é composta por um corpo (constituído por três partes) e uma tampa ligados entre si por aparafusamento, ambos produzidos por quinagem e soldadura de chapas. O componente aquando do serviço apresentou duas zonas com fissuração prematura: no corpo do componente, junto de um cordão de soldadura, e na tampa do mesmo, sem qualquer cordão de soldadura.

Na primeira fase do desenvolvimento desta dissertação foram realizadas simulações numéricas, através do *software* Abaqus/CAE 6.14 ©, de modo a obter as tensões a que o componente está sujeito. Determinaram-se os modos de vibração, e respetivas tensões, extensões e deformações máximas.

O método analítico consiste na determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões para as duas zonas onde o componente formou fendas. Recorreu-se à norma BS 7910:2013 + A1:2015 e ao *software* GNU Octave 4.2.2 © para cálculo automático das mesmas. Realizaram-se 12 rotinas diferentes, cada uma correspondente a um conjunto de parâmetros e condições respetivo às zonas onde o componente fissurou. A propagação de fenda foi estudada em detalhe, obtendo-se a velocidade de propagação das fissuras e a durabilidade da caixa redutora.

**Palavras-Chave:** Propagação de fenda, Modos próprios de vibração, Caixa Redutora, Gama dos fatores de intensidade de tensões, Componente ferroviário, Simulação por elementos finitos.



## Abstract

The present dissertation consists of establishing a methodology for the determination of the durability of a railway component. The component studied is the gearbox of a locomotive that failed prematurely due to fatigue. This is composed of a body (constituted of three parts) and a cover connected with bolts, both manufactured through bending and welding of metal sheets. When in service, the component showed two zones with premature cracking: on the body of the component, near a weld, and on the cover, without any weld.

In the first phase of the development of this dissertation numerical analyses were performed, using the *software* Abaqus/CAE 6.14 ©, to obtain the stresses that the component is subjected to. The modes of vibration, and respective maximum stresses, strains and deformations were determined.

The analytic method consists of the determination of the stress intensity factor ranges for the two zones where the component formed cracks. The standard BS 7910:2013 + A1:2015 and the *software* GNU Octave 4.2.2 © were used to perform the automatic calculation of these. In total, 12 different routines were made, each corresponding to a different set of parameters and conditions respective to the zones where the component cracked. The crack growth was studied in detail, obtaining the crack growth rate and the durability of the gearbox.

**Keywords:** Crack growth, Vibration modes, Gearbox, Stress intensity factor range, Railway component, Finite element simulation.





# Índice

Capítulo 1 - Enquadramento .....	1
1.1. Motivação e Objetivo .....	1
1.2. Estrutura da Dissertação.....	4
Capítulo 2 - Estado da Arte .....	7
2.1. Processo de soldadura por fusão .....	7
2.2. Defeitos do processo de soldadura por fusão .....	8
2.3. Norma BS 7910:2013 + A1:2015.....	11
2.4. Casos de Estudo .....	15
Capítulo 3 - Simulação Numérica .....	21
3.1. Simplificação do Modelo .....	21
3.2. Processo de Discretização do Modelo.....	31
3.3. Simulação.....	35
3.4. Análise de Resultados .....	38
Capítulo 4 - Método Analítico .....	55
4.1. Rotinas em Octave .....	55
4.2. Parâmetros.....	59
4.3. Análise e Discussão de Resultados .....	64
Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros .....	79
Bibliografia .....	83
Anexo A - Códigos das rotinas em Octave .....	85
A.1. Códigos das rotinas do Conjunto A.....	85
A.1.1. Código da rotina do Conjunto A respetivo ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	85
A.1.2. Código da rotina do Conjunto A respetivo ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	90
A.1.3. Código da rotina do Conjunto A respetivo ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	95
A.1.4. Código da rotina do Conjunto A respetivo ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	101
A.1.5. Código da rotina do Conjunto A respetivo a um defeito embebido na tampa .....	107
A.1.6. Código da rotina do Conjunto A respetivo a um defeito superficial na tampa .....	111
A.2. Códigos das rotinas do Conjunto B.....	116

A.2.1. Código da rotina do Conjunto B respetivo ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	116
A.2.2. Código da rotina do Conjunto B respetivo ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	121
A.2.3. Código da rotina do Conjunto B respetivo ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	126
A.2.4. Código da rotina do Conjunto B respetivo ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	132
A.2.5. Código da rotina do Conjunto B respetivo a um defeito embebido na tampa .....	138
A.2.6. Código da rotina do Conjunto B respetivo a um defeito superficial na tampa .....	142
Anexo B - Gráficos dos Resultados .....	147
B.1. Resultados das rotinas do Conjunto A.....	147
B.1.1. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	147
B.1.2. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	150
B.1.3. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	153
B.1.4. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	156
B.1.5. Gráficos correspondentes a um defeito embebido na tampa .....	159
B.1.6. Gráficos correspondentes a um defeito superficial na tampa .....	162
B.2. Resultados das rotinas do Conjunto B.....	165
B.2.1. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	165
B.2.2. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	168
B.2.3. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	171
B.2.4. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo .....	174
B.2.5. Gráficos correspondentes a um defeito embebido na tampa .....	177
B.2.6. Gráficos correspondentes a um defeito superficial na tampa .....	180

# Índice de Figuras

Figura 1.1 - Conjunto Corpo e Tampa da Caixa Redutora (perspetiva do topo do conjunto) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado]. .....	1
Figura 1.2 - Conjunto Corpo e Tampa da Caixa Redutora (perspetiva da traseira do conjunto) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado]. .....	2
Figura 1.3 - Conjunto Corpo e Tampa sujeitos a um ensaio não-destrutivo com líquidos penetrantes [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado]. .....	2
Figura 1.4 - Representação das posições das rosetas (vista frontal) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado]. .....	3
Figura 1.5 - Representação das posições das rosetas (vista traseira) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado]. .....	3
Figura 2.1 - Representação das zonas constituintes de um cordão de soldadura, e da temperatura relativa imposta a cada uma dessas zonas (adaptado de [4]). .....	7
Figura 2.2 - Diferentes tipos de poros esféricos: 1) ninhos de poros; 2) poros uniformemente distribuídos; 3) alinhados [5]. .....	8
Figura 2.3 - Representação esquemática de uma inclusão sólida num cordão de soldadura [5]. .....	9
Figura 2.4 - Exemplos de juntas com falta de fusão; a) no flanco; b) na raiz [5]. .....	9
Figura 2.5 - Exemplos de juntas com falta de penetração [5]. .....	9
Figura 2.6 - Defeitos de forma mais importantes (adaptado de [5]). .....	10
Figura 2.7 - Modos de carregamento de uma fenda (adaptado de [6]). .....	12
Figura 2.8 - Sistema de eixos com origem na extremidade da fenda [5]. .....	13
Figura 3.1 – Perspetiva frontal (a) e traseira (b) do modelo tridimensional original do componente, com identificação das diferentes partes constituintes da caixa. ....	22
Figura 3.2 – Perspetiva frontal (a) e traseira (b) do primeiro modelo do componente simplificado. ....	23
Figura 3.3 - Comparação entre o modelo original (a) e a primeira versão do modelo simplificado (b). .....	24
Figura 3.4 – Comparação da face frontal entre a primeira versão (a) e a segunda versão do modelo simplificado (b). .....	24
Figura 3.5 - Comparação da face frontal entre a segunda versão (a) e a terceira versão do modelo simplificado (b). .....	25
Figura 3.6 – Comparação da face frontal entre a terceira versão (a) e a quarta versão do modelo simplificado (b). .....	25

Figura 3.7 – Comparação do interior do modelo entre a quarta versão, (a) e (b) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente), e quinta a versão do modelo simplificado, (c) e (d) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente). .....	26
Figura 3.8 - Comparação da face frontal entre a quinta versão (a) e a sexta versão do modelo simplificado (b). .....	27
Figura 3.9 – Comparação do interior do modelo entre a sexta versão, (a) e (b) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente), e a sétima versão do modelo simplificado, (c) e (d) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente). .....	28
Figura 3.10 – Comparação do interior do modelo entre a sétima versão (a) e a oitava versão do modelo simplificado (b). .....	28
Figura 3.11 – Comparação do interior do modelo entre a oitava versão, (a) e (b) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente), e a nona versão do modelo simplificado, (c) e (d) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente). .....	29
Figura 3.12 – Comparação do interior do modelo entre a nona versão (a) e a última versão do modelo simplificado (b). .....	30
Figura 3.13 – Perspetiva frontal (a) e traseira (b) do modelo tridimensional simplificado finalizado do componente. ....	31
Figura 3.14 - Representação das partições efetuadas ao modelo em Abaqus. ....	32
Figura 3.15 – Tipo de elemento finito utilizado, C3D4. ....	32
Figura 3.16 - Malha 1 do componente em Abaqus. ....	33
Figura 3.17 - Malha 2 do componente em Abaqus. ....	33
Figura 3.18 - Malha 3 do componente em Abaqus. ....	34
Figura 3.19 - Malha 4 do componente em Abaqus. ....	34
Figura 3.20 - Representação das restrições impostas ao modelo para simulação em Abaqus. ....	36
Figura 3.21 - 1º modo de vibração da malha 1.....	39
Figura 3.22 - 2º modo de vibração da malha 1.....	40
Figura 3.23 - 3º modo de vibração da malha 1.....	40
Figura 3.24 - 4º modo de vibração da malha 1.....	41
Figura 3.25 - 5º modo de vibração da malha 1.....	41
Figura 3.26 - 1º modo de vibração da malha 2.....	42
Figura 3.27 - 2º modo de vibração da malha 2.....	42
Figura 3.28 - 3º modo de vibração da malha 2.....	43
Figura 3.29 - 4º modo de vibração da malha 2.....	43
Figura 3.30 - 5º modo de vibração da malha 2.....	44
Figura 3.31 - 1º modo de vibração da malha 3.....	44
Figura 3.32 - 2º modo de vibração da malha 3.....	45

Figura 3.33 - 3º modo de vibração da malha 3.....	45
Figura 3.34 - 4º modo de vibração da malha 3.....	46
Figura 3.35 - 5º modo de vibração da malha 3.....	46
Figura 3.36 - 1º modo de vibração da malha 4.....	47
Figura 3.37 - 2º modo de vibração da malha 4.....	47
Figura 3.38 - 3º modo de vibração da malha 4.....	48
Figura 3.39 - 4º modo de vibração da malha 4.....	48
Figura 3.40 - 5º modo de vibração da malha 4.....	49
Figura 4.1 - Esquema representativo do <b>Conjunto A</b> de rotinas realizadas, considerando $\theta$ , $a$ e $c$ independentes. ....	56
Figura 4.2 - Esquema representativo do <b>Conjunto B</b> de rotinas realizadas, considerando $\theta$ e $a$ independentes. Neste conjunto $c$ é definido como função de $a$ . ....	56
Figura 4.3 - Exemplo de representação da matriz tridimensional em forma de $k$ matrizes de dimensão $m \times n$ .....	58
Figura 4.4 - Exemplo de representação da matriz tridimensional em forma de vetor com dimensão $l = m \times n \times k$ . ....	58
Figura 4.5 - Em (a) encontra-se uma representação de um defeito elíptico embebido na chapa e em (b) encontra-se uma representação de um defeito semi-elíptico superficial na chapa (adaptado de [2]). ....	59
Figura 4.6 - Representação da geometria do cordão de soldadura presente na zona central do corpo da caixa [2]. ....	60
Figura 4.7 - Gráfico que relaciona $da/dN$ com $\Delta K$ para o ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo. $C=6.87E-9$ , $m=3$ . ....	67
Figura 4.8 - Gráfico que relaciona $a$ com $N$ para o ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo. $C=6.87E-9$ , $m=3$ . ....	68
Figura 4.9 - Gráfico que relaciona $da/dN$ com $\Delta K$ para o ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo. $C=6.87E-9$ , $m=3$ . ....	69
Figura 4.10 - Gráfico que relaciona $a$ com $N$ para o ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo. $C=6.87E-9$ , $m=3$ . ....	69
Figura 4.11 - Gráfico que relaciona $da/dN$ com $\Delta K$ para um defeito embebido na zona da tampa (zona sem soldadura). $C=6.87E-9$ , $m=3$ . ....	70
Figura 4.12 - Gráfico que relaciona $a$ com $N$ para um defeito embebido na zona da tampa (zona sem soldadura). $C=6.87E-9$ , $m=3$ . ....	70
Figura 4.13 - Gráfico que relaciona $da/dN$ com $\Delta K$ para um defeito superficial na zona da tampa (zona sem soldadura). $C=6.87E-9$ , $m=3$ . ....	71

Figura 4.14 - Gráfico que relaciona $a$ com $N$ para um defeito superficial na zona da tampa (zona sem soldadura). $C=6.87E-9$ , $m=3$ .....	71
Figura 4.15 - Gráfico que relaciona $a$ com $\Delta K$ para o ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	75
Figura 4.16 - Gráfico que relaciona $a$ com $\Delta K$ para o ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	75
Figura 4.17 - Gráfico que relaciona $a$ com $\Delta K$ para um defeito embebido na zona da tampa (zona sem soldadura).....	76
Figura 4.18 - Gráfico que relaciona $a$ com $\Delta K$ para um defeito superficial na zona da tampa (zona sem soldadura).....	76
Figura B.1.1 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	149
Figura B.1.2 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	152
Figura B.1.3 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	155
Figura B.1.4 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	158
Figura B.1.5 – Gráficos do Conjunto A correspondentes a um defeito embebido na zona da tampa. ....	161
Figura B.1.6 – Gráficos do Conjunto A correspondentes a um defeito superficial na zona da tampa. ....	164
Figura B.2.1 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	167
Figura B.2.2 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	170
Figura B.2.3 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	173
Figura B.2.4 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.....	176
Figura B.2.5 – Gráficos do Conjunto B correspondentes a um defeito embebido na zona da tampa. ....	179
Figura B.2.6 – Gráficos do Conjunto B correspondentes a um defeito superficial na zona da tampa. ....	182

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Resumo do número de elementos e nós das 4 malhas realizadas.....	35
Tabela 3.2 - Tensões equivalentes de von Mises máximas e mínimas no componente para a amplitude máxima de cada modo de vibração, e frequência do modo de vibração, para as 4 malhas realizadas. ....	50
Tabela 3.3 - Tensões linearizadas do caso mais crítico na zona do defeito do corpo. ...	51
Tabela 3.4 - Tensões linearizadas do caso mais crítico na zona do defeito da tampa. ...	52
Tabela 3.5 - Tensões linearizadas na zona nominal do caso mais crítico do defeito do corpo.....	53
Tabela 4.1 - Tabela comparativa das equações da evolução da velocidade de crescimento de fenda para os diferentes casos possíveis, para a zona central do corpo e para a zona da tampa, assumindo as direções de propagação, $\theta$ , de 15° e 90° . ....	72
Tabela 4.2 - Tabela comparativa do número de ciclos que o componente realiza para os diferentes casos possíveis, para a zona central do corpo e para a zona da tampa, assumindo as direções de propagação, $\theta$ , de 15° e 90° .....	73





## Lista de Siglas

BS – British Standard;

CP – Comboios de Portugal, E.P.E.;

CSV – *Comma-Separated Values*;

CTOD – *Crack Tip Opening Displacement*;

EMEF – Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário, S.A.;

END – Ensaio Não-Destrutivo.

## Lista de Símbolos

$a$  – altura do defeito superficial; meia altura do defeito embebido; altura de fenda;

$a_0$  – altura de fenda inicial;

$a_{máx}$  – altura de fenda máxima;

$B$  – espessura da chapa em que um defeito se encontra;

$B'$  – espessura efetiva da chapa em que um defeito se encontra;

$c$  – metade do comprimento de defeito;

$C$  – coeficiente do material;

$[C]$  – matriz de amortecimento;

$E$  – módulo de elasticidade;

$f_w$  – fator de correção da largura finita;

$f_\theta$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;

$f_1$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;

$f_2$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;

$f_3$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;

$F_{i,j}$  – parâmetro de cálculo da tensão  $\sigma_{i,j}$ ;

$g$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;

$H$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;

$[I]$  – matriz identidade;

$k_m$  – fator de intensidade de tensões devido a desalinhamentos;

$k_{tb}$  – fator de concentração de tensões de flexão;

$k_{t_{flexão}}$  – fator de concentração de tensões de flexão;

$k_{tm}$  – fator de concentração de tensões de membrana;

$k_{t_{membrana}}$  – fator de concentração de tensões de membrana;

$K$  – fator de intensidade de tensões;

$K_{IC}$  – resiliência ao entalhe em estado plano de extensão;

$K_{ICST}$  – valor limiar do fator de intensidade de tensões em corrosão sob tensão;  
 $\Delta K$  – gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $[K]$  – matriz de rigidez;  
 $m$  – expoente do material;  
 $M$  – fator de correção de abaulamento;  
 $M_1$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $M_2$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $M_3$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $M_b$  – fator de magnificação de intensidade de tensões;  
 $M_{kb}$  – fator de magnificação de intensidade de tensões;  
 $M_{km}$  – fator de magnificação de intensidade de tensões;  
 $M_m$  – fator de magnificação de intensidade de tensões;  
 $[M]$  – matriz de massa;  
 $N$  – número de ciclos previstos à fadiga;  
 $L$  – largura do cordão de soldadura;  
 $p$  – profundidade a que o defeito embebido se encontra;  
 $r$  – raio num sistema de coordenadas polares na extremidade da fenda;  
 $R^2$  – coeficiente de determinação;  
 $[R]$  – matriz do residual do *solver Lanczos*;  
 $S$  – tensão aplicada a um componente em fadiga;  
 $[S]$  – matriz dos vetores próprios;  
 $[T]$  – matriz auxiliar do *solver Lanczos*;  
 $[U]$  – matriz auxiliar do *solver Lanczos*;  
 $[V]$  – matriz auxiliar do *solver Lanczos*;  
 $W$  – comprimento da chapa em que o defeito se encontra;  
 $Y$  – fator geométrico adimensional da Mecânica da Fratura Linear Elástica;  
 $\alpha$  – matriz auxiliar do *solver Lanczos*;  
 $\beta$  – matriz triangular superior de dimensões  $b \times b$ ;  
 $\theta$  – valor próprio transformado; ângulo num sistema de coordenadas polares na extremidade da fenda; direção de propagação da fenda;  
 $[\theta]$  – matriz dos valores próprios;  
 $\lambda_1$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $\lambda_2$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $\lambda_3$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $\lambda_4$  – parâmetro auxiliar para o cálculo da gama dos fatores de intensidade de tensões;  
 $\mu$  – valor próprio;

$\nu$  – coeficiente de Poisson;  
 $\rho$  – massa volúmica;  
 $\sigma$  – tensão nominal remotamente aplicada; variável de deslocamento;  
 $\sigma_{flexão}$  – tensão de flexão;  
 $\sigma_{i,j}$  – tensão para um ponto  $(r, \theta)$  num referencial com origem na extremidade da fenda;  
 $\sigma_{membrana}$  – tensão de membrana;  
 $\sigma_{membrana+flexão}$  – tensão de membrana e flexão;  
 $\sigma_{pico}$  – tensão de pico;  
 $\Delta\sigma$  – gama de tensões nominais remotamente aplicadas;  
 $\Delta\sigma_b$  – gama de tensões de flexão;  
 $\Delta\sigma_{flexão}$  – gama de tensões de flexão;  
 $\Delta\sigma_m$  – gama de tensões de membrana;  
 $\Delta\sigma_{membrana}$  – gama de tensões de membrana;  
 $\{\phi\}$  – vetor próprio;  
 $\Phi$  – integral elíptica do segundo tipo;  
 $\omega$  – frequência angular.

# Capítulo 1 - Enquadramento

## 1.1. Motivação e Objetivo

A presente dissertação surge em seguimento do estudo realizado no artigo “A failure study of housing of the gearboxes of series 2600 locomotives of the Portuguese Railway Company”, da autoria de Morgado *et al.* [1].

O componente estudado é a casca de uma caixa redutora da locomotiva série 2600 da empresa Comboios de Portugal, E.P.E. (CP). Esta caixa é composta por 4 partes: 3 partes, constituem o corpo, e a outra parte constitui a tampa. Todos estes elementos estão ligados entre si por parafusos. Cada uma destas partes é uma estrutura composta por chapas de aço quinadas e soldadas entre si (Figuras 1.1 e 1.2) [1].



Figura 1.1 - Conjunto Corpo e Tampa da Caixa Redutora (perspetiva do topo do conjunto) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado].

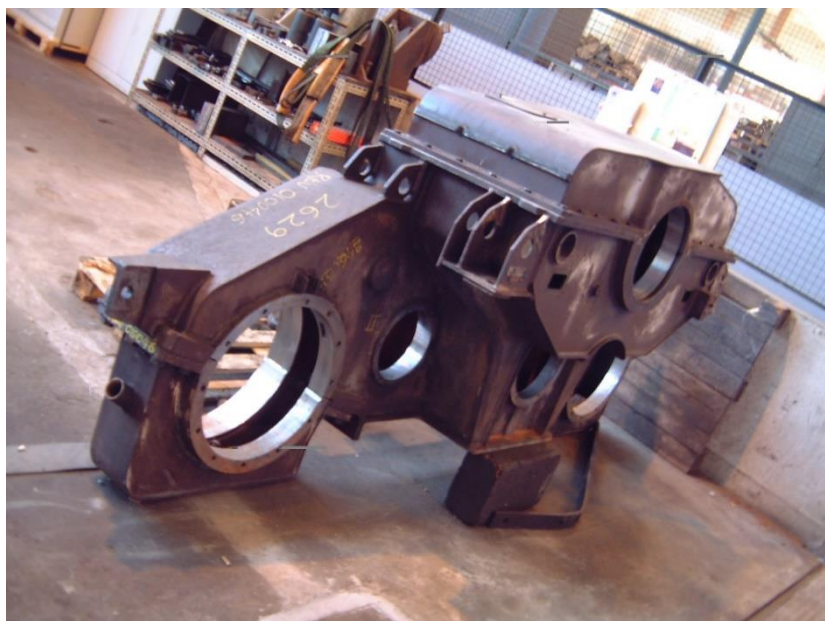


Figura 1.2 - Conjunto Corpo e Tampa da Caixa Redutora (perspetiva da traseira do conjunto) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado].

Durante as inspeções estipuladas pela Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário, S.A. (EMEF), foram detetadas fissuras através de ensaios não-destrutivos (END) com líquidos penetrantes (Figura 1.3). Encontraram-se estas fendas junto a um cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa e no topo da tampa da caixa redutora [1].

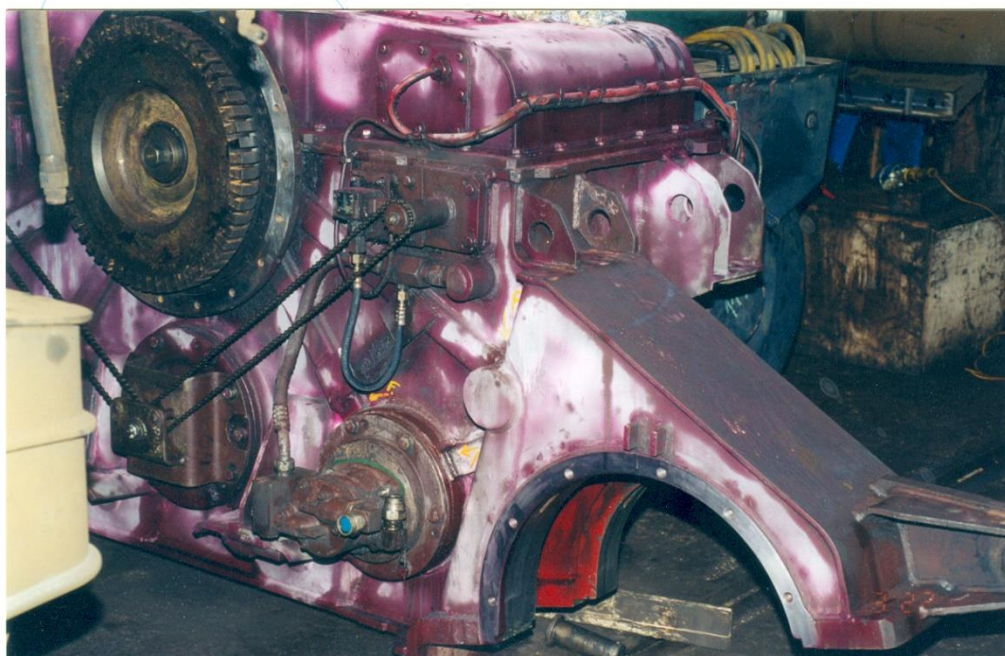


Figura 1.3 - Conjunto Corpo e Tampa sujeitos a um ensaio não-destrutivo com líquidos penetrantes [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado].

A caixa redutora ferroviária formou fendas nos pontos onde Morgado *et al.* [1] colocaram as rosetas 1 e 3, como indicado nas Figuras 1.4 e 1.5.

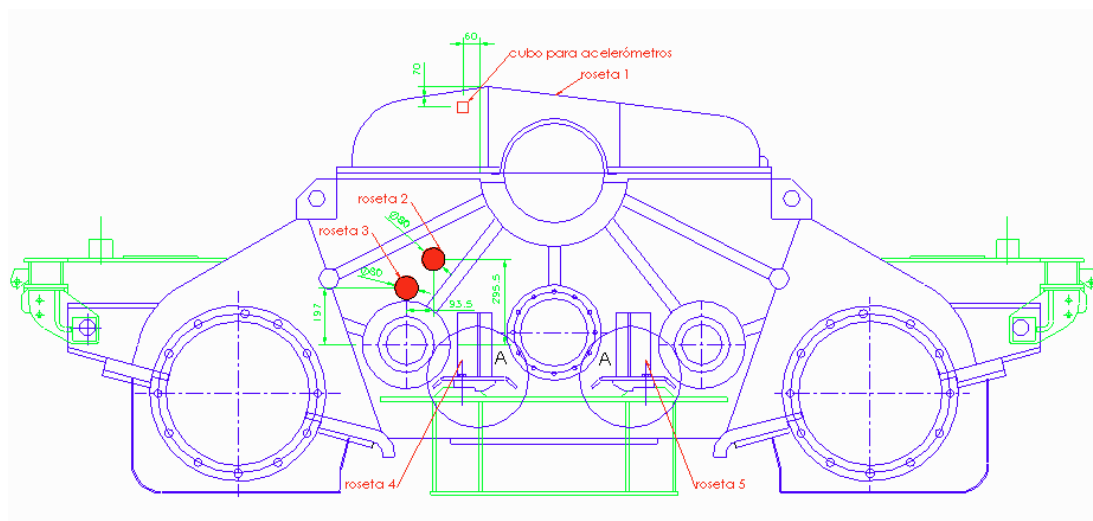


Figura 1.4 - Representação das posições das rosetas (vista frontal) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado].

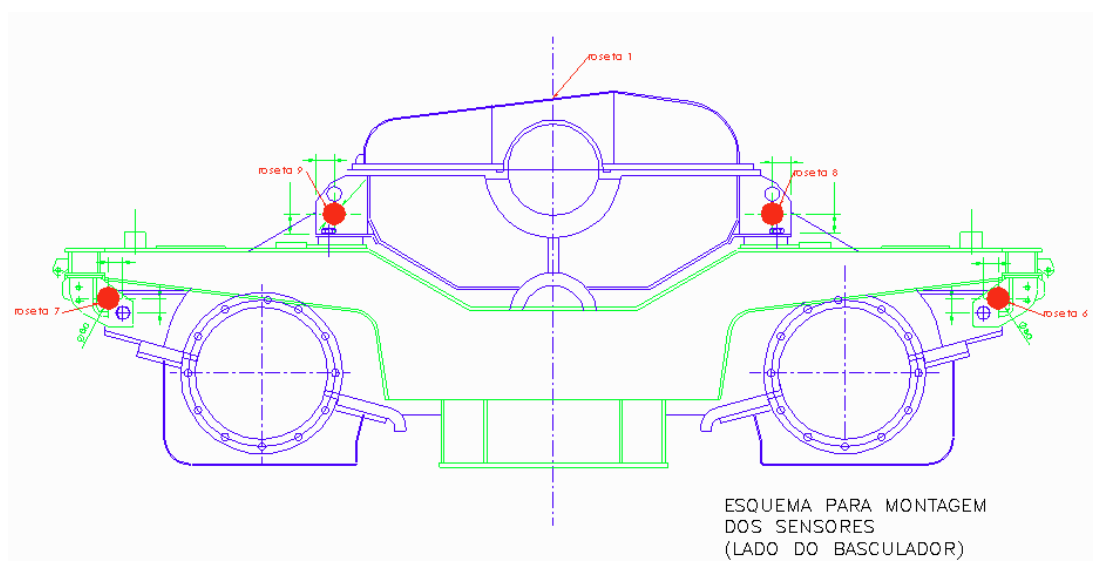


Figura 1.5 - Representação das posições das rosetas (vista traseira) [Imagem cedida por cortesia da Professora Teresa Morgado].

Após estudo de causa de falhas, Morgado *et al.* [1] concluíram que o componente apresentava rotura por fadiga estrutural, junto a um cordão de soldadura na zona central do corpo da estrutura (na localização da roseta 3 na Figura 1.4) e no topo da tampa (na localização da roseta 1 nas Figuras 1.4 e 1.5).

No âmbito desta dissertação pretende-se desenvolver um modelo de previsão de vida à fadiga da caixa redutora ferroviária (Figuras 1.1 e 1.2) através de métodos numéricos (por meio de simulação, e recorrendo ao formulário da norma BS 7910:2013 + A1:2015 [2]) levando em

consideração que esta está sujeita a vibrações mecânicas, e admitindo que se encontram defeitos de fabrico nos dois pontos mais críticos da casca, na zona central do corpo e no topo da tampa, onde Morgado *et al.* [1] identificaram fendas de tamanhos críticos.

O objetivo principal desta dissertação foi desenvolver um método para a determinação da durabilidade da caixa redutora ferroviária (Figuras 1.1 e 1.2). Com este intuito, foram estudados os modos próprios de vibração por simulação numérica, assim como as solicitações a que o componente está sujeito devido às mesmas, e as gamas dos fatores de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) foram determinadas admitindo defeitos de fabrico do processo de soldadura e do processo de laminagem. Para a simulação por elementos finitos recorreu-se ao *software* Abaqus/CAE 6.14 ©. A análise numérica posterior foi realizada com o *software* GNU Octave 4.2.2 ©, dispondo da norma BS 7910:2013 + A1:2015 [2], para obtenção das gamas dos fatores de intensidade de tensões. Para a simulação por elementos finitos foi necessária uma simplificação do modelo, para a qual se utilizou o *software* Solidworks ® Student Edition 2016-2017.

O tratamento de dados foi realizado com o *software* Microsoft ® Excel ® do Office 365, no qual se obteve a evolução da gama dos fatores de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) e o número de ciclos previsto ( $N$ ) relativamente à altura da fenda ( $a$ ), o valor da gama dos fatores de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) para a relação entre a altura e o comprimento do defeito considerado ( $a/c$ ), e a gama dos fatores de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) em função da velocidade de propagação da fenda ( $da/dN$ ).

## 1.2. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, compostos por diversos subcapítulos.

No “Capítulo 1 – Enquadramento”, apresenta-se, além deste subcapítulo, “Estrutura da Dissertação”, a “Motivação e Objetivo” que levou ao desenvolvimento da presente dissertação.

No “Capítulo 2 – Estado da Arte”, encontra-se uma revisão de vários casos de estudo relacionados com o tópico de falha/ruína por fadiga, que estudam a origem de falha de componentes semelhantes ou em condições análogas, e que investigam a influência de defeitos de fabrico no tempo de vida de um componente em serviço. Também neste capítulo encontra-se um subcapítulo de revisão de conceitos presentes na norma BS 7910 [2]. Este capítulo aborda tópicos importantes para esta dissertação e reúne várias fontes de informação que foram essenciais para a realização deste trabalho.

O “Capítulo 3 – Simulação Numérica” aborda os passos realizados na realização da simulação numérica em Abaqus. Este capítulo subdivide-se em “Simplificação do Modelo”, “Processo de Discretização do Modelo”, “Simulação” e “Análise de Resultados”. O capítulo

inclui uma descrição do processo de simplificação do modelo para posterior discretização, uma explicação dos passos realizados durante a simulação e uma análise objetiva dos resultados da mesma.

O “Capítulo 4 – Método Analítico” reúne as equações da norma BS 7910 [2] que permitem determinar a gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , para diferentes tipos de defeito e em diferentes posições. O capítulo divide-se em “Rotinas em Octave”, “Parâmetros” e “Análise e Discussão de Resultados”. No subcapítulo de “Análise e Discussão de Resultados” realiza-se o tratamento de dados onde se obtêm resultados sobre o número de ciclos esperado do componente,  $N$ , e a gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , para várias configurações e posições de defeitos.

No “Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros” encontram-se as conclusões do estudo efetuado e realizam-se propostas para trabalhos futuros.





## Capítulo 2 - Estado da Arte

### 2.1. Processo de soldadura por fusão

Para ser possível fabricar estruturas grandes ou de geometria complexa é muitas vezes necessária a união de várias partes, e é por isso que os processos de adição são tão importantes. Entre os vários processos de adição existentes, um dos mais frequentemente praticados é a soldadura, e mais em específico, soldadura por fusão [3].

A soldadura por fusão consiste em fundir e unir os materiais base dos componentes e pode ou não envolver um material de adição. A junta soldada é submetida a um processo térmico a elevada temperatura, pelo que o material ganha propriedades mecânicas diferentes do restante material base. Assim distinguem-se 3 zonas com propriedades distintas, que podem ser observadas na Figura 2.1 [4]:

- Material base;
- Zona termicamente afetada;
- Material de adição.

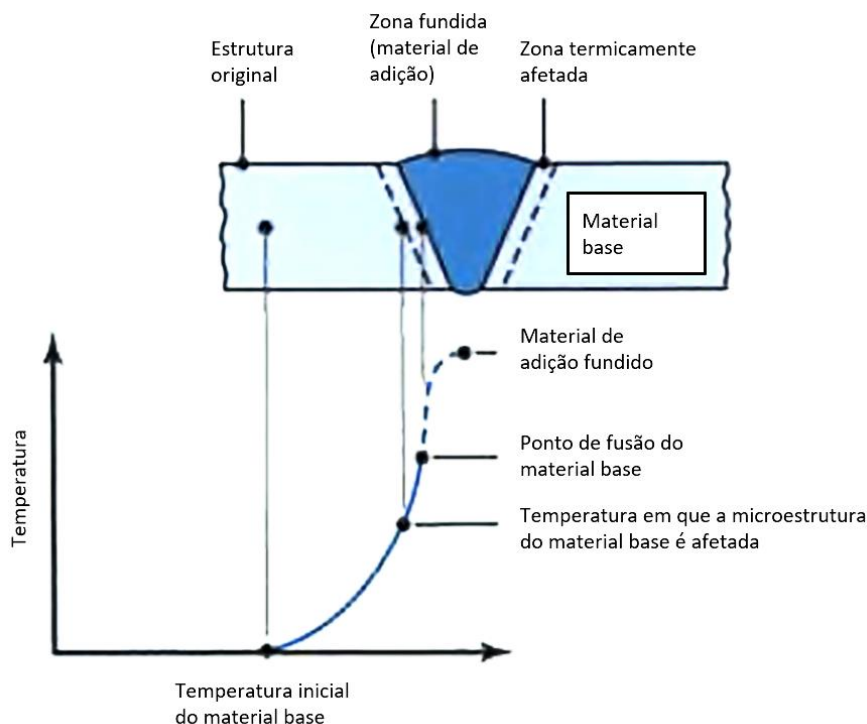


Figura 2.1 - Representação das zonas constituintes de um cordão de soldadura, e da temperatura relativa imposta a cada uma dessas zonas (adaptado de [4]).

Um arrefecimento lento da zona termicamente afetada origina uma recristalização que forma grãos mais grosseiros. Tipicamente, isto significa que a zona termicamente afetada tem uma menor resistência mecânica e por isso é uma zona vulnerável a falha por fadiga [4].

## 2.2. Defeitos do processo de soldadura por fusão

Um cordão de soldadura pode resultar defeituoso caso haja um mau manuseamento da ferramenta ou descuidos na limpeza da peça [4]. Estes defeitos podem diminuir o número de ciclos previstos até à falha para um componente sujeito à fadiga, levando a um tempo em serviço menor que o projetado. Para determinação se um defeito irá ou não causar falha prematura do componente, é preciso uma avaliação do mesmo via ensaio não-destrutivo [2].

Os defeitos do processo de soldadura por fusão podem ser divididos nas seguintes categorias: defeitos não planares e defeitos planares. Os defeitos não planares consistem em defeitos com volume, e podem ser de dois tipos [2], [5]:

- Porosidades;
- Inclusões sólidas;
- Redução de espessura.

Os poros podem ser esféricos, alongados ou vermiculares (com forma de verme), e os poros esféricos podem ser, por sua vez, uniformemente distribuídos, em ninho ou alinhados (Figura 2.2) [5].

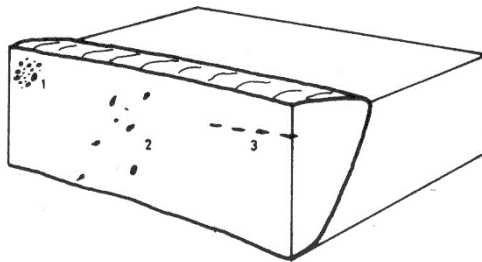


Figura 2.2 - Diferentes tipos de poros esféricos: 1) ninhos de poros; 2) poros uniformemente distribuídos; 3) alinhados [5].

As inclusões sólidas são constituídas por corpos estranhos incluídos na massa do metal fundido e dividem-se em inclusões de escória (dispersas, alinhadas ou isoladas), inclusões de fluxo (dispersas, alinhadas ou isoladas), inclusões de óxidos e inclusões metálicas. Tipicamente a inclusão mais comum é a inclusão de escória devido a uma má limpeza do cordão de soldadura entre passagens (Figura 2.3) [4], [5].

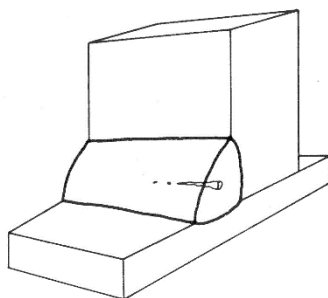


Figura 2.3 - Representação esquemática de uma inclusão sólida num cordão de soldadura [5].

Os defeitos planares consistem em defeitos na superfície do cordão, e dividem-se em [2], [4], [5]:

- Faltas de fusão;
- Faltas de penetração;
- Defeitos de forma.

A falta de fusão ocorre quando o material base e o material de adição não se ligam ou fundem corretamente, deixando juntas com geometrias deficientes ou espaços por preencher, e uma falta de penetração é uma falta de fusão nos bordos a soldar na raiz da junta (Figuras 2.4 e 2.5) [4], [5].

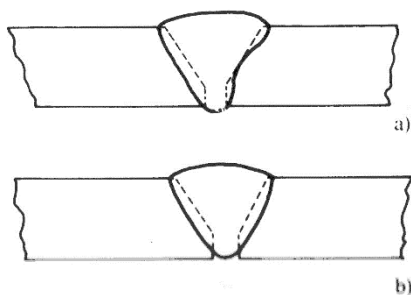


Figura 2.4 - Exemplos de juntas com falta de fusão; a) no flanco; b) na raiz [5].

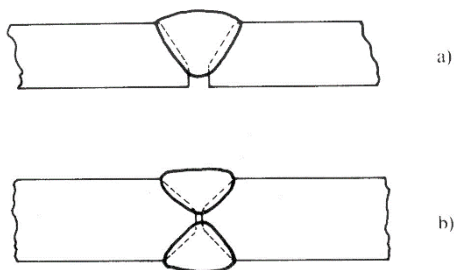


Figura 2.5 - Exemplos de juntas com falta de penetração [5].

Os defeitos de forma podem ser de variados tipos, e enumeram-se de seguida (Figura 2.6) [4], [5]:

- Sulcos (Figura 2.6 (a));
- Mordeduras (Figura 2.6 (b) e (c));
- Excessos de metal (Figura 2.6 (d));
- Convexidades em excesso (Figura 2.6 (e));
- Excessos de penetração (Figura 2.6 (f));
- Concordâncias imperfeitas (Figura 2.6 (g));
- Desbordos (Figura 2.6 (h) e (i));
- Escorrimentos (Figura 2.6 (j));
- Desalinhamentos axiais ou angulares;
- Rechupes (Figura 2.6 (k));
- Recomeços imperfeitos (Figura 2.6 (l)).

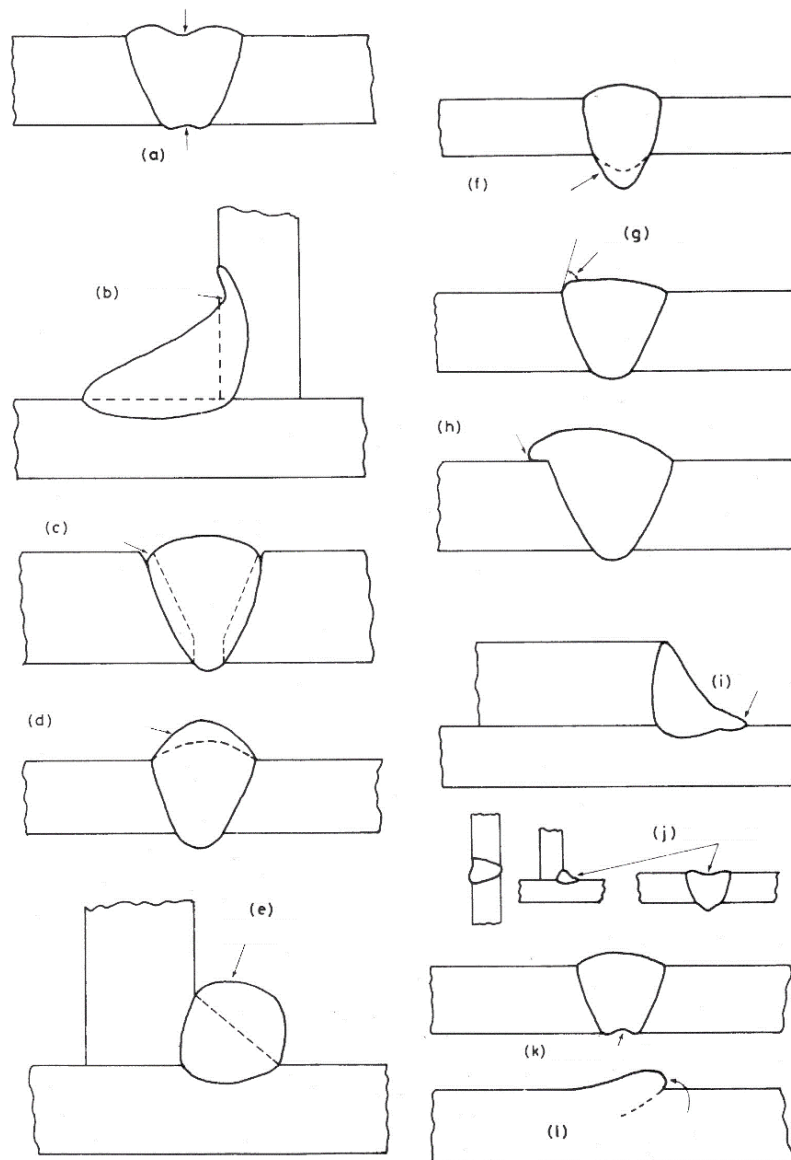


Figura 2.6 - Defeitos de forma mais importantes (adaptado de [5]).

Os END que se podem realizar para identificar defeitos que criem fenda na superfície são [2], [4]:

- Inspeção visual;
- Líquidos penetrantes;
- Partículas magnéticas;
- Correntes induzidas;
- Potencial elétrico;
- Radiografia;
- Ultrassons.

Para identificar defeitos embebidos no cordão podem-se utilizar os seguintes ensaios [2], [4]:

- Radiografia;
- Ultrassons;
- Correntes induzidas;
- Potencial elétrico.

A existência de defeitos no material pode reduzir ou até eliminar a fase de iniciação de fissuras de fadiga. Isto significa que o tempo de vida de um componente que contém defeitos de fabrico é principalmente dependente da velocidade de propagação de fissura. Visto que a fase de iniciação pode representar mais de 90% da vida cíclica do componente, a presença de defeitos de fabrico que eliminem essa fase significa uma redução grande no tempo de vida total do mesmo até à falha [5].

### **2.3. Norma BS 7910:2013 + A1:2015**

Segundo a norma BS 7910:2013 + A1:2015 [2], para se fazer a avaliação de um defeito deve-se reunir informação sobre os seguintes tópicos:

- Tipo de defeito, e respetiva posição e orientação;
- Geometrias da estrutura e do cordão de soldadura e processo de fabrico;
- Tensões e temperaturas a que o componente está sujeito;
- Tensão de cedência ou tensão limite de elasticidade, tensão de rotura e módulo de elasticidade (ou em certos casos a curva inteira de tensão/extensão);
- Curva Tensão-Número de ciclos de vida (curva S-N), devido a fadiga ou fadiga por corrosão e informação sobre a propagação de fendas;
- Resistência à fratura ( $K_{IC}$  – resiliência ao entalhe em estado plano de extensão, ou valores do integral J ou CTOD – *Crack Tip Opening Displacement*);

- Ruptura por fluência, propagação de fissuras por fluência e fadiga por fluência;
- Corrosão e  $K_{ICST}$  (valor limiar do fator de intensidade de tensões em corrosão sob tensão).

O parâmetro  $K$  representa o fator de intensidade de tensões e é definido pela Equação 2.1 [2], [5]:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

onde  $\sigma$  é a tensão nominal remotamente aplicada e  $Y$  um fator geométrico adimensional que depende da configuração do corpo e da fenda, para uma fenda de altura,  $a$ . O fator  $Y$  pode ser determinado por meio analítico, numérico ou experimental [6].

O parâmetro  $K$  define a distribuição de tensões na extremidade da fenda, isto é, mesmo que duas fendas tenham comprimentos diferentes, se tiverem o mesmo valor do parâmetro  $K$  então têm a mesma distribuição de tensões na sua extremidade [6].

Na Figura 2.7 apresentam-se os modos de carregamento de uma fenda.

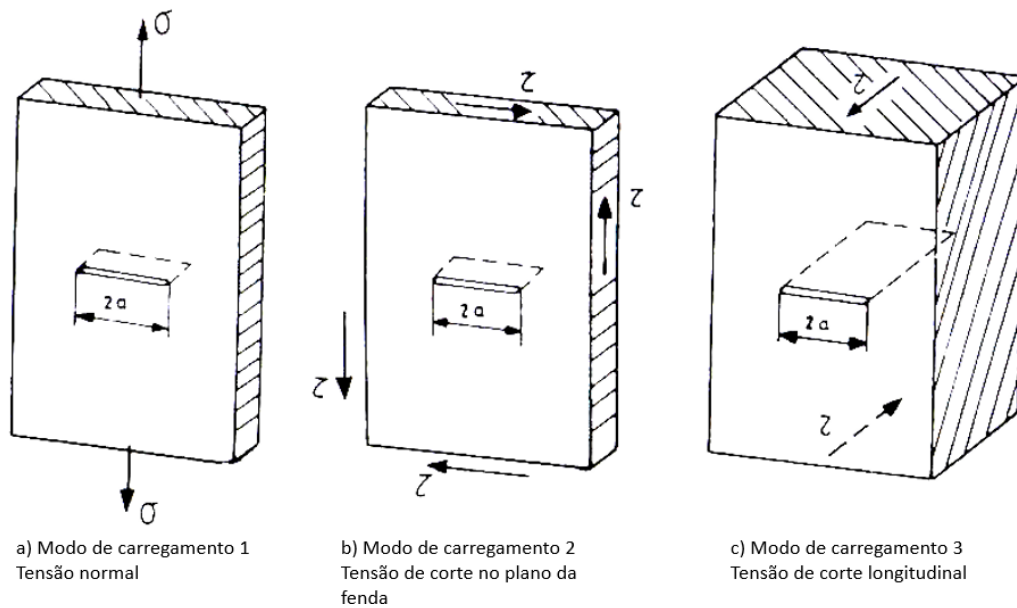


Figura 2.7 - Modos de carregamento de uma fenda (adaptado de [6]).

A distribuição das tensões na extremidade de uma fenda para o modo de carregamento 1 é definida pela Equação 2.2, para um ponto definido pelas coordenadas polares  $(r, \theta)$ , num referencial com origem na extremidade da fenda. O parâmetro  $F_{i,j}(\theta)$  é função de  $\theta$ , e varia entre 0 e 1, sendo  $F_{xx}(\theta = 0) = 1$ ,  $F_{yy}(\theta = 0) = 1$  e  $F_{xy}(\theta = 0) = 0$  [6].

$$\sigma_{i,j} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} F_{i,j}(\theta) \quad (2.2)$$

Na Figura 2.8 está esboçado o referencial para a tensão  $\sigma_{i,j}$  junto à extremidade da fenda, definida na Equação 2.2.

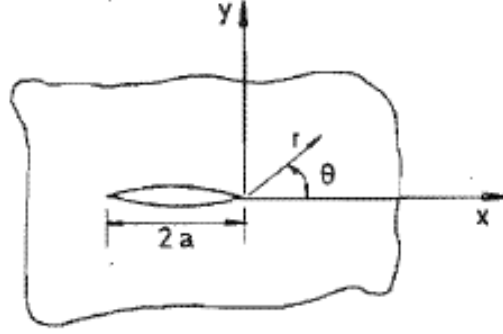


Figura 2.8 - Sistema de eixos com origem na extremidade da fenda [5].

Se o raio da extremidade da fenda for muito baixo a tensão nessa extremidade é muito elevada. Teoricamente, se a extremidade da fenda tivesse raio igual a zero a tensão nesse ponto seria infinita. Como na prática não existem extremidades de fendas com raio igual a zero, a tensão será máxima e finita nesse ponto, diminuindo com a distância à fenda [6].

Para casos de fadiga define-se o parâmetro  $\Delta K$ , gama dos fatores de intensidade de tensões, que é definido pela Equação 2.3 [2]:

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

onde  $Y$  é o fator geométrico,  $a$ , a altura da fenda, e  $\Delta \sigma$ , a gama de tensões nominais remotamente aplicadas.

A norma BS 7910 [2] indica a Equação 2.4 para a determinação da multiplicação entre o fator geométrico e a gama de tensões nominalmente aplicadas,  $Y \Delta \sigma$ :

$$Y \Delta \sigma = M f_w \{k_{tm} M_{km} M_m \Delta \sigma_m + k_{tb} M_{kb} M_b [\Delta \sigma_b + (k_m - 1) \Delta \sigma_m]\} \quad (2.4)$$

onde  $Y$  é o fator geométrico,  $\Delta \sigma$ , a gama de tensões nominais remotamente aplicadas,  $M$ , o fator de correção de abaulamento,  $f_w$ , o fator de correção da largura finita,  $M_m$ ,  $M_b$ ,  $M_{km}$  e  $M_{kb}$  são fatores de magnificação de intensidade de tensões,  $\Delta \sigma_m$  e  $\Delta \sigma_b$ , as gamas de tensões de membrana e de flexão aplicadas, respetivamente,  $k_{tm}$  e  $k_{tb}$ , os fatores de concentração de tensões de membrana e flexão, respetivamente, e  $k_m$ , o fator de intensidade de tensões devido a desalinhamentos.

Para os defeitos embebidos,  $M$  e  $f_w$ , tomam os valores apresentados nas Equações 2.5 e 2.6, respetivamente [2]:



$$M = 1 \quad (2.5)$$

$$f_w = \left\{ \sec \left[ \left( \frac{\pi c}{W} \right) \left( \frac{a}{B'} \right)^{0.5} \right] \right\}^{0.5} \quad (2.6)$$

e para defeitos superficiais,  $M$  e  $f_w$ , tomam os valores apresentados nas Equações 2.7 e 2.8, respetivamente [2]:

$$M = 1 \quad (2.7)$$

$$f_w = \left\{ \sec \left[ \left( \frac{\pi c}{W} \right) \left( \frac{a}{B} \right)^{0.5} \right] \right\}^{0.5} \quad (2.8)$$

onde  $a$  é metade da altura do defeito para um defeito embebido e a altura total do defeito para um defeito superficial,  $c$ , metade do comprimento do defeito,  $B$ , a espessura da chapa,  $W$ , o comprimento da chapa e  $B'$  é a espessura efetiva da chapa (para o defeito embebido) que é definida pela Equação 2.9 [2]:

$$B' = 2a + 2p \quad (2.9)$$

onde  $a$  é metade da altura do defeito embebido e  $p$  é a profundidade a que o defeito se encontra embebido.

Os fatores  $M_m$  e  $M_b$  para um defeito embebido são definidos pelas Equações 2.10 e 2.11, respetivamente [2]:

$$M_m = \left[ M_1 + M_2 \left( \frac{2a}{B'} \right)^2 + M_3 \left( \frac{2a}{B'} \right)^4 \right] \frac{gf_\theta}{\Phi} \quad (2.10)$$

$$M_b = \left[ \frac{\lambda_1 + \lambda_2 \left( \frac{p}{B} \right) + \lambda_3 \left( \frac{a}{B} \right) + \lambda_4 \left( \frac{pa}{B^2} \right)}{\Phi} \right] \quad (2.11)$$

e para defeitos superficiais são definidos pelas Equações 2.12 e 2.13, respetivamente [2]:

$$M_m = \left[ M_1 + M_2 \left( \frac{a}{B} \right)^2 + M_3 \left( \frac{a}{B} \right)^4 \right] \frac{gf_\theta}{\Phi} \quad (2.12)$$

$$M_b = HM_m \quad (2.13)$$

onde  $a$  é metade da altura para um defeito embebido e a altura total para um defeito superficial,  $p$ , a profundidade a que o defeito embebido se encontra,  $B$ , a espessura da chapa,  $B'$ , a espessura efetiva da chapa,  $\Phi$ , é a integral elíptica do segundo tipo, e  $f_\theta$ ,  $g$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  e  $H$  são parâmetros auxiliares para o cálculo, definidos por conjuntos próprios de equações.

Os fatores  $M_{km}$  e  $M_{kb}$  são especificados para zonas com cordão de soldadura presente e são definidos pelas Equações 2.14 e 2.15, respetivamente, para calcular as gamas dos fatores de

intensidade de tensões para os pontos mais profundos dos defeitos, e pelas Equações 2.16 e 2.17, respetivamente, para os pontos menos profundos dos mesmos [2]:

$$M_{km} = f_1\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right) + f_2\left(\frac{a}{B}\right) + f_3\left(\frac{a}{B}, \frac{L}{B}\right) \quad (2.14)$$

$$M_{kb} = f_1\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right) + f_2\left(\frac{a}{B}\right) + f_3\left(\frac{a}{B}, \frac{L}{B}\right) \quad (2.15)$$

$$M_{km} = f_1\left(\frac{a}{B}, \frac{c}{a}, \frac{L}{B}\right) \times f_2\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right) \times f_3\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}, \frac{L}{B}\right) \quad (2.16)$$

$$M_{kb} = f_1\left(\frac{a}{B}, \frac{c}{a}, \frac{L}{B}\right) \times f_2\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right) \times f_3\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}, \frac{L}{B}\right) \quad (2.17)$$

onde  $L$  é a largura máxima entre cordões de soldadura,  $f_1\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right)$ ,  $f_2\left(\frac{a}{B}\right)$  e  $f_3\left(\frac{a}{B}, \frac{L}{B}\right)$  são parâmetros auxiliares para o cálculo, definidos por conjuntos próprios de equações, funções de  $\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right)$ ,  $\left(\frac{a}{B}\right)$  e  $\left(\frac{a}{B}, \frac{L}{B}\right)$ , respetivamente, e  $f_1\left(\frac{a}{B}, \frac{c}{a}, \frac{L}{B}\right)$ ,  $f_2\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right)$  e  $f_3\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}, \frac{L}{B}\right)$  são outros parâmetros auxiliares para o cálculo, definidos por outros conjuntos próprios de equações, funções de  $\left(\frac{a}{B}, \frac{c}{a}, \frac{L}{B}\right)$ ,  $\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}\right)$  e  $\left(\frac{a}{B}, \frac{a}{c}, \frac{L}{B}\right)$ , respetivamente.

## 2.4. Casos de Estudo

De seguida apresentam-se casos de estudo na área da mecânica de fratura. De entre estes casos encontram-se estudos efetuados a caixas redutoras ferroviárias, assim como a outros componentes em condições de serviço semelhantes, e estudos efetuados a cordões de soldadura sob fadiga, que apuram métodos de análise da propagação de fissuras e que contabilizam o efeito da presença de defeitos do processo de soldadura.

Com o objetivo de analisar a formação de fendas numa caixa redutora de um comboio de alta velocidade, Hu *et al.* [7] realizaram análises de fratura, análises de elementos finitos e testes no campo com as tensões e acelerações reais aplicadas sobre o componente. As análises de tempo, frequência e tempo-frequência indicaram que os primeiros dois modos de vibração eram excitados por massas descentradas nas rodas e irregularidades nos carris. A proximidade destes modos de vibração resultou em fenómenos de batimento vibratório que aumentou a probabilidade de exceder os limites de fadiga, podendo resultar em danos graves no componente. Após a análise à fratura concluíram que a resistência a fadiga da zona da fenda foi reduzida pelo processo de vazamento e que por isso o componente sofreu falha por fadiga. Observaram ainda que para prevenir a falha antecipada do componente podia-se melhorar o processo de vazamento de modo a reduzir o número de porosidades, assim como redesenhar a casca da caixa redutora.

Semelhantemente, Zhang, *et al.* [8] estudaram a ocorrência de fendas numa caixa redutora de um comboio de alta velocidade com recurso a testes de vibração, análises dinâmicas de tensões

e análises modais. De acordo com as análises dinâmicas de tensões e de vibrações verificaram a ocorrência de batimento para velocidades da ordem dos 300 km/h. A frequência de ressonância da caixa redutora para a qual verificaram os efeitos prejudiciais rondava entre os 580 Hz (verificado nos testes de vibração), 596 Hz (verificado nos testes de tensão) e 601.1 Hz (verificado na análise modal). Daí concluíram que a causa das fendas na caixa redutora se devia ao facto de a frequência na caixa imposta pela linha ferroviária ser próxima da frequência de ressonância do componente e a um desenho estrutural inadequado. Visto que o comboio circulava a uma velocidade de cerca de 300 km/h, Zhang *et al.* concluíram que frequências de 580 Hz sobre a caixa redutora eram inevitáveis e por isso propuseram soluções de reforço estrutural do componente e melhorias ao desenho para evitar concentrações de tensões no componente.

Sonsino [9] desenvolveu uma metodologia para investigar as causas da falha prematura numa caixa redutora de alumínio de um veículo ferroviário. Determinou as zonas com elevadas tensões, o espectro de carga para diferentes condições operacionais (via medições de extensões em serviço), apurou o comportamento do material à fadiga, calculou o tempo de vida à fadiga e formou critérios para o desenho ótimo do componente, para escolha do material e para controlo de qualidade. Concluiu que, sabendo que esforços iriam ocorrer em serviço sobre o componente, poderiam ser impostas condições durante o projeto do componente e níveis de qualidade a atingir que permitiriam ao componente cumprir o tempo de vida previsto. Concluiu ainda que os esforços deveriam ser determinados num protótipo do componente, quando possível, para obter valores reais antes do projeto do componente ser terminado, de modo a ser possível projetar com os valores reais e evitar falhas no componente no futuro.

Kumar *et al.* [10] realizaram uma modelação a 3 dimensões e consecutiva análise de vibrações da casca da caixa redutora de um camião. A causa principal de falha foi a fissuração da casca da caixa redutora devido a fadiga do componente em serviço. Depois de modelarem a casca da caixa, realizaram a análise dos primeiros 20 modos de vibração do componente em estudo.

Com a intenção de apurar a origem da falha prematura de um veio de uma caixa redutora, Moolwan e Netpu [11] realizaram uma série de análises ao mesmo. Primeiro inspecionaram o componente visualmente e microscopicamente, depois mediram a dureza do mesmo na região soldada e na região não soldada, e fizeram uma análise química para obter o tipo de aço utilizado na produção do veio, assim como um estudo metalográfico para obter a microestrutura do aço constituinte. Observaram que a zona soldada continha inclusões que originaram a falha prematura e também que o veio falhou por fadiga. Por isso, posteriormente determinaram a tensão limite de fadiga e concluíram que a carga aplicada no componente era maior que o valor determinado. A zona soldada sofria de um elevado nível de concentração de tensões devido a uma preparação inadequada para a soldadura (pré-aquecimento incorreto). Concluíram ainda que a superfície do veio devia ser sujeita a tratamentos térmicos para aumentar a rigidez superficial.

Após a falha grave do veio de um elevador em serviço, Göksenli e Eryürek [12] efetuaram um estudo de modo a apurar a origem da falha. Foi realizada uma inspeção visual, da qual concluíram que o componente estava sujeito a fadiga de torção-flexão (por observação das linhas de fadiga na secção do veio) e ainda que o escatel fora produzido com um raio de curvatura muito pequeno, originando um efeito de entalhe muito elevado. Foram ainda realizadas análises químicas, e ensaios mecânicos e microestruturais para determinar as propriedades do material. De seguida determinaram os esforços aplicados no componente em serviço e o comportamento em fadiga do mesmo, considerando o efeito de entalhe criado pelo pequeno raio de curvatura do escatel. Após cálculo dos esforços, efetuaram uma análise de elementos finitos para obter a distribuição de tensões da zona do escatel. Concluíram que a falha por fadiga teve origem na zona de pequeno raio de curvatura e que o efeito de entalhe podia ser reduzido drasticamente aumentando o raio de curvatura na referida zona, levando a uma menor concentração de tensões e consequentemente a um maior tempo de vida.

Zyl e Al-Sahli [13] estudaram também a origem de falha de um veio. Para tal realizaram inspeção visual e inspeção estereoscópica, fizeram análises químicas, estudos metalográficos e ensaios mecânicos (de tração, de impacto, de fadiga e dureza) para caracterizar o material do componente. Após as inspeções realizadas e os ensaios efetuados concluíram que o componente falhou por fadiga, mas concluíram também que não foi devido às cargas sofridas em serviço pois essas alcançavam apenas metade do valor do limite de fadiga, consoante a simulação de elementos finitos. Apuraram por fim que a fadiga foi agravada devido a uma zona termicamente afetada (resultante de uma soldadura e causadora de uma diminuição na resistência do material à fadiga) presente num canto vivo do componente, que originou uma zona de concentração de tensões. Concluíram que o desenho do componente era apropriado ao serviço realizado, mas que o processo de reparação do mesmo foi inadequado resultando na falha deste devido a fadiga.

Darcis *et al.* [14] formularam uma nova metodologia para analisar o crescimento de fendas em juntas soldadas. O objetivo do trabalho foi unificar abordagens diferentes de modo a criar um modelo para análise de fendas em crescimento que respeita regras e regulamentos em prática, o Eurocode 3 e a BS 7910. Por fim compararam o modelo que criaram com as metodologias estabelecidas e definiram condições de uso para o modelo criado.

Também com o objetivo de estudar o comportamento de estruturas soldadas sujeitas a fadiga, Ottersböck *et al.* [15] determinaram o efeito que defeitos do processo de soldadura têm na vida à fadiga de aços de muito alta resistência. Os provetes estudados foram chapas soldadas topo a topo com sulcos junto do pé do cordão de soldadura. Para tal inspecionaram visualmente os defeitos em cada provete e mediram por meio de topografia a geometria dos mesmos. Depois realizaram processamento de imagem para obter as propriedades geométricas dos defeitos e criaram um modelo numérico desses defeitos para utilizar na determinação dos fatores de

concentração de tensões nas respectivas zonas, através do *software* Abaqus ©. Por fim avaliaram a influência que os sulcos no cordão de soldadura tiveram no tempo de vida dos provetes testados.

Ainda no mesmo âmbito, Seko *et al.* [16] estudaram o efeito que a presença de defeitos embebidos em cordões de soldadura tem na geometria das fendas e na tensão residual resultante do processo de soldadura, por meio de análises de elementos finitos. Consideraram uma chapa de 200 mm de comprimento e largura, e 25 mm de espessura, e que esta continha uma fenda de 6 a 9 mm de altura, 40 mm de comprimento a uma profundidade entre 2 e 9.5 mm utilizando elementos finitos iso-paramétricos de 8 nós para a análise de elementos finitos. Introduziram uma tensão residual resultante da junta soldada nos parâmetros e determinaram o CTOD, as extensões, as tensões de Weibull e a tensão de abertura da fenda (tensão local na extremidade da fenda e paralela à superfície da fenda). Foi concluído, com base nas tensões de Weibull, que quanto menor a profundidade do defeito embebido, menor o limite de fratura frágil; que a tensão residual devido ao cordão de soldadura resulta numa redução do limite de fratura frágil para extensões menores que a extensão de cedência; e que as tensões de Weibull com tensão residual da soldadura são aproximadamente iguais às tensões sem tensão residual da soldadura, para extensões acima da extensão de cedência.

Pang *et al.* [17] realizaram estudos sobre a propagação de fissuras em provetes cortados a partir de tubos circulares soldados topo a topo. Foram realizados ensaios de flexão em 4 pontos em provetes sujeitos a esforços de fadiga. Os estudos consistiram em formular um novo modelo de análise de propagação de fissuras que fosse mais preciso e menos simplificado que os modelos atuais, de modo a obter-se resultados mais precisos e previsões de vida menos conservadoras. Para tal, incorporaram nas análises a coalescência das fissuras e o fecho das fissuras.

Morgado *et al.* [1] estudaram a caixa redutora de uma locomotiva (Figuras 1.1 e 1.2), sujeita a vibrações e fadiga, composta por um corpo e uma tampa. Caracterizaram o material através de análises químicas, ensaios de dureza e ensaios mecânicos a amostras das duas partes do componente (corpo e tampa). Colocaram 9 rosetas de 45° em diferentes pontos do componente e recolheram dados aquando do funcionamento deste, para diferentes percursos realizados pela locomotiva. Identificaram as rosetas com extensões maiores (presentes nos apoios do componente) e determinaram as tensões máximas e mínimas aplicadas nas mesmas. De seguida aplicaram a regra de Miner para diferentes valores de dano e obtiveram o número de ciclos que o componente realizou, assim como as curvas de tensão aplicada versus número de ciclos realizados (S-N). Realizaram ainda uma simulação numérica para obter a força de reação no apoio do componente. Por fim concluíram que o material do corpo da caixa redutora não era resistente nem dúctil o suficiente para a aplicação e que o material da tampa não era o indicado para a aplicação apesar de possuir melhores propriedades que o material do corpo. Concluíram ainda que as

tensões no componente e as forças de reação nos apoios eram elevadas, originando problemas de fissuração por fadiga.



## Capítulo 3 - Simulação Numérica

Para obter informação sobre as tensões e deformações sofridas na caixa redutora procedeu-se a uma simulação numérica no *software* Abaqus. O componente foi primeiro simplificado no *software* Solidworks, de modo a otimizar o processo de discretização e simulação. Como resultado desta análise numérica obteve-se os modos de vibração e deformações do componente, assim como as respetivas distribuições de tensões para os vários modos de vibração.

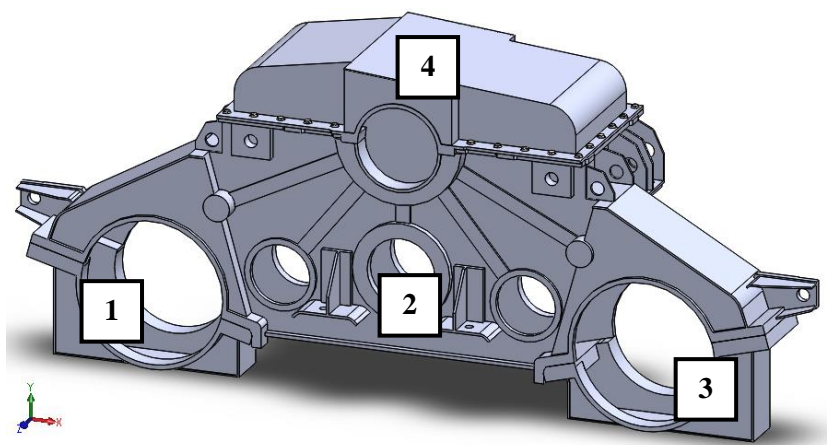
### 3.1. Simplificação do Modelo

Para o processo de discretização e para o processo de simulação serem realizados mais eficientemente foi realizada uma série de simplificações ao modelo do componente em Solidworks. Estas simplificações consistiram em modificações ao desenho técnico original com o propósito de reduzir a quantidade de detalhes e saliências não essenciais, que aumentavam o tempo necessário para o processo de discretização e para o processo de computação.

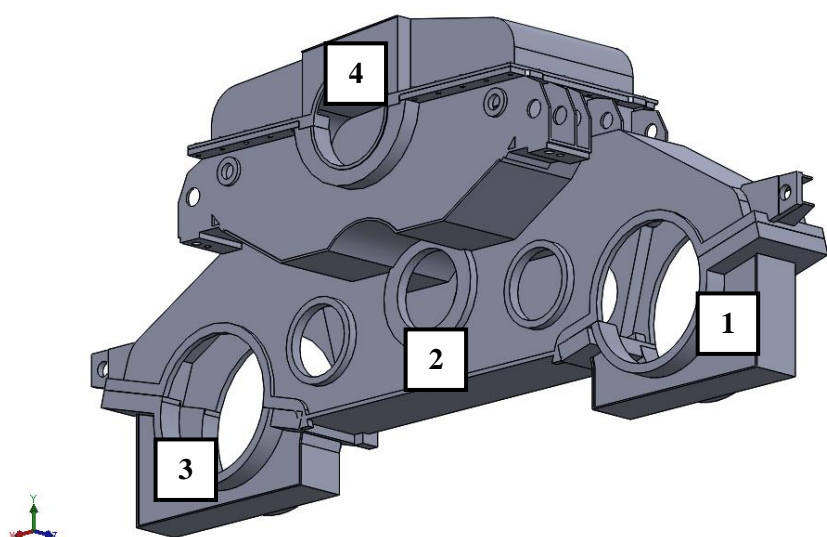
Na Figura 3.1 apresenta-se o modelo original que é composto pelas 3 partes constituintes do corpo da caixa e pela tampa. As 3 partes do corpo encontram-se identificadas na Figura 3.1 pelos números 1 a 3. Os componentes laterais (partes 1 e 3) estão montados no corpo, como apresentado na Figura 3.1, com ligações aparafusadas, assim como a tampa, que se encontra ligada por 28 parafusos ao topo da parte central do corpo, e está representada pelo número 4.

Também se pode observar no modelo original os pontos de apoio do mesmo. Em cada extremidade lateral do corpo encontra-se um ponto de apoio que restringe o movimento do corpo lateralmente e verticalmente. Na parte superior do corpo existe também um ponto de apoio de cada lado para restringir o movimento nas mesmas direções. Na face frontal do corpo encontram-se dois pontos de encastramento. Estes seis pontos de apoio do corpo montam no bogie da locomotiva. A base do corpo encontra-se apoiada verticalmente no bogie. A zona em redor do furo dividido entre a tampa e o corpo, centrado em ambos, encontra-se encastrada à caixa envolvente do motor propulsor da locomotiva, acoplado à caixa redutora.





(a)

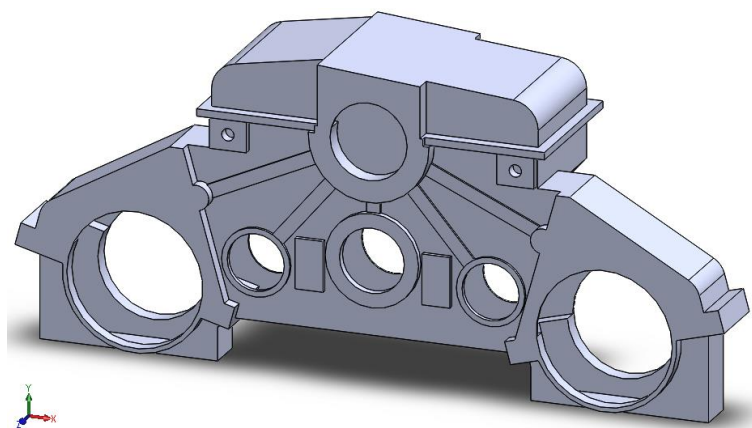


(b)

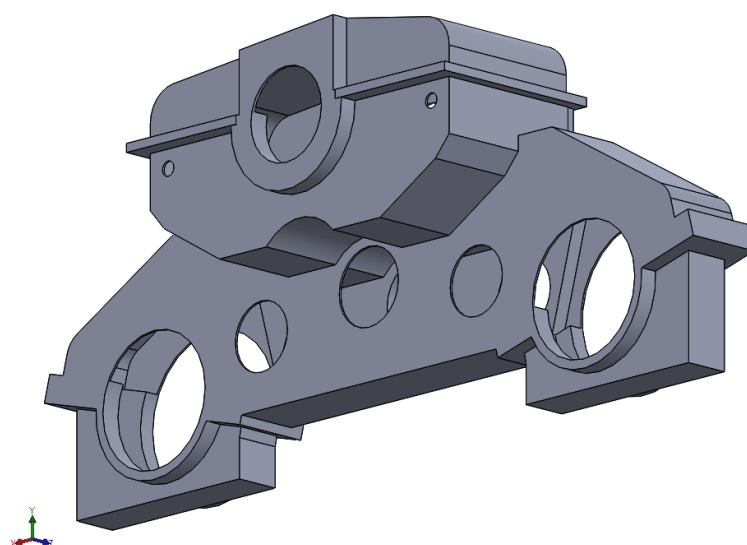
Figura 3.1 – Perspectiva frontal (a) e traseira (b) do modelo tridimensional original do componente, com identificação das diferentes partes constituintes da caixa.

Na Figura 3.2 mostra-se o primeiro passo da simplificação efetuada ao componente, em que se unificou as diferentes partes constituintes do corpo e da tampa numa peça única (eliminando todos os elementos de ligação) e se retiraram pequenas saliências e partes do componente de geometria complexa. Este passo foi conseguido por remodelação completa do componente, de modo a evitar erros acumulados por alterações consecutivas ao modelo original.

Tanto os apoios laterais como os apoios superiores na parte central do corpo foram removidos pois continham geometria demasiado complexa para o processo de discretização. Cada apoio adicionaria muitas partições ao modelo em Abaqus e complicaria o processo de discretização. Saliências de pequena dimensão foram também retiradas com a mesma intenção.



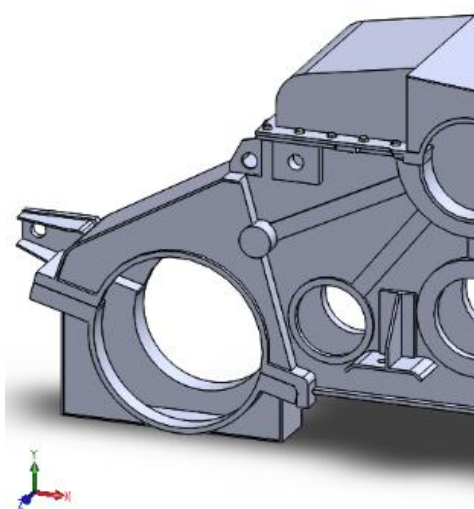
(a)



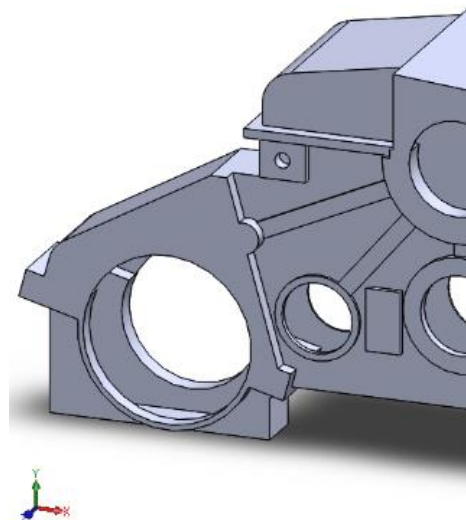
(b)

Figura 3.2 – Perspetiva frontal (a) e traseira (b) do primeiro modelo do componente simplificado.

Como se pode verificar na Figura 3.3, as 3 partes que constituem o corpo, assim como a tampa, foram unificadas numa só peça, o que reduziu o número de superfícies do componente. Por conseguinte também se removeram os parafusos que ligavam a tampa ao corpo da caixa. Observa-se ainda a ausência das partes laterais, frontais e nas laterais superiores do corpo (junto da tampa), que realizam o apoio do componente.



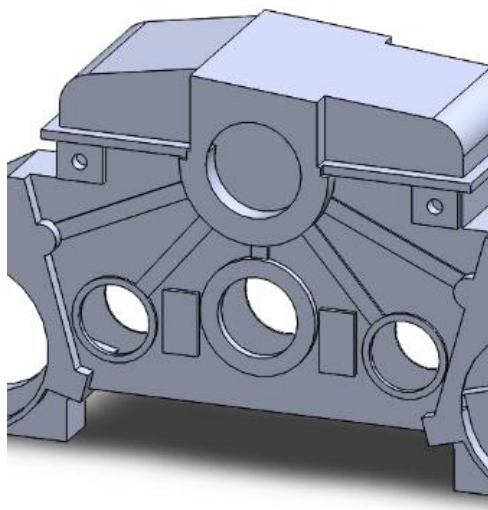
(a)



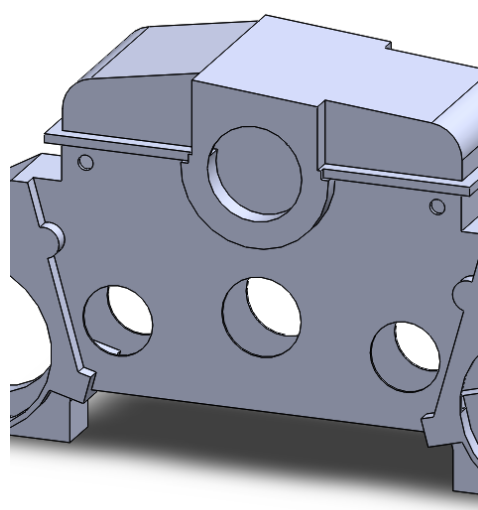
(b)

Figura 3.3 - Comparação entre o modelo original (a) e a primeira versão do modelo simplificado (b).

No passo seguinte da simplificação do modelo, foi realizada uma redução de saliências da superfície frontal do modelo, como pode ser verificado na Figura 3.4.



(a)



(b)

Figura 3.4 – Comparação da face frontal entre a primeira versão (a) e a segunda versão do modelo simplificado (b).

Seguidamente retiraram-se as saliências cilíndricas também da face frontal, tal como se observa nas áreas destacadas na Figura 3.5.

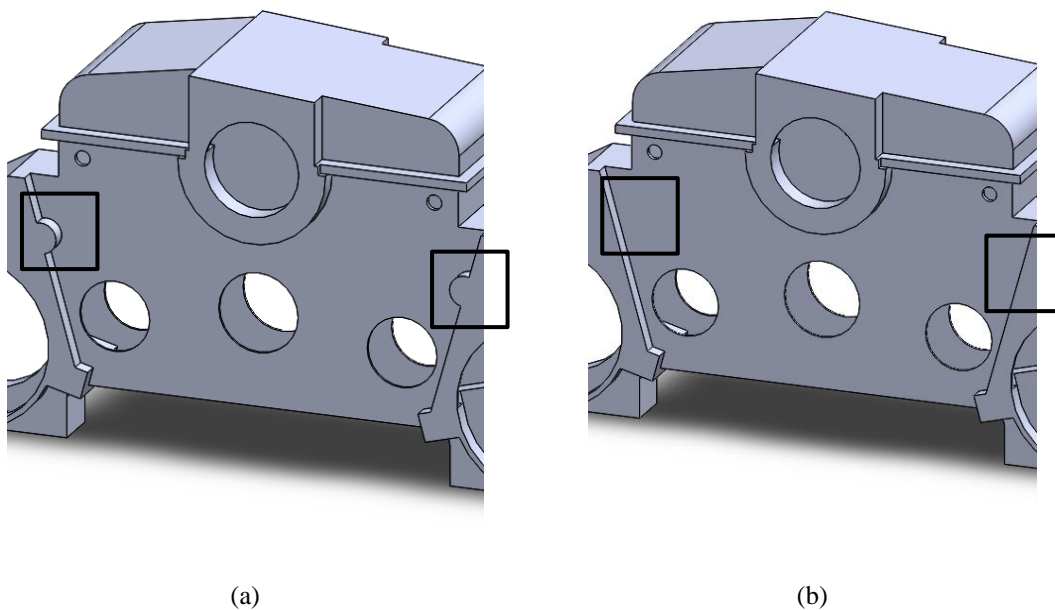


Figura 3.5 - Comparação da face frontal entre a segunda versão (a) e a terceira versão do modelo simplificado (b).

Na Figura 3.6 mostra-se a reposição das bases dos pontos de apoio frontais por serem essenciais para a definição da área a encastrar em Abaqus.

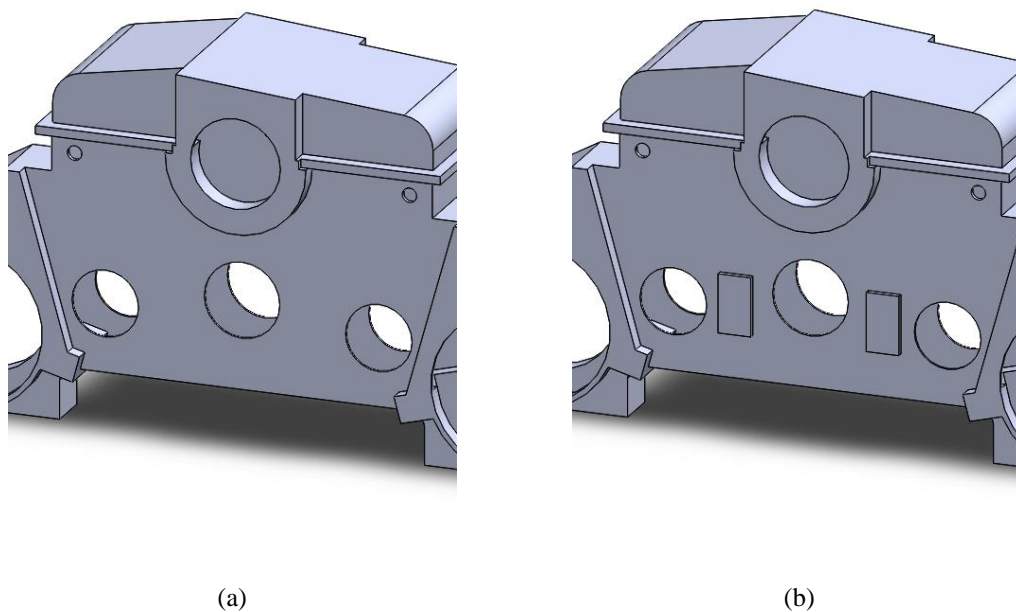


Figura 3.6 – Comparação da face frontal entre a terceira versão (a) e a quarta versão do modelo simplificado (b).

Na Figura 3.7 podem-se observar as alterações realizadas ao interior do modelo. Estas foram realizadas com o propósito de simplificar a geometria do interior da base do corpo, porque, como se pode observar na Figura 3.7, este tinha uma geometria inadequada para o processo de discretização do modelo, visto que continha uma descontinuidade provocada pela superfície

inclinada (transversal ao furo). Depois da simplificação resultou um “chão” do interior do corpo perfeitamente horizontal até ao bordo do furo, que foi adicionado para o aproximar o modelo ao componente real.

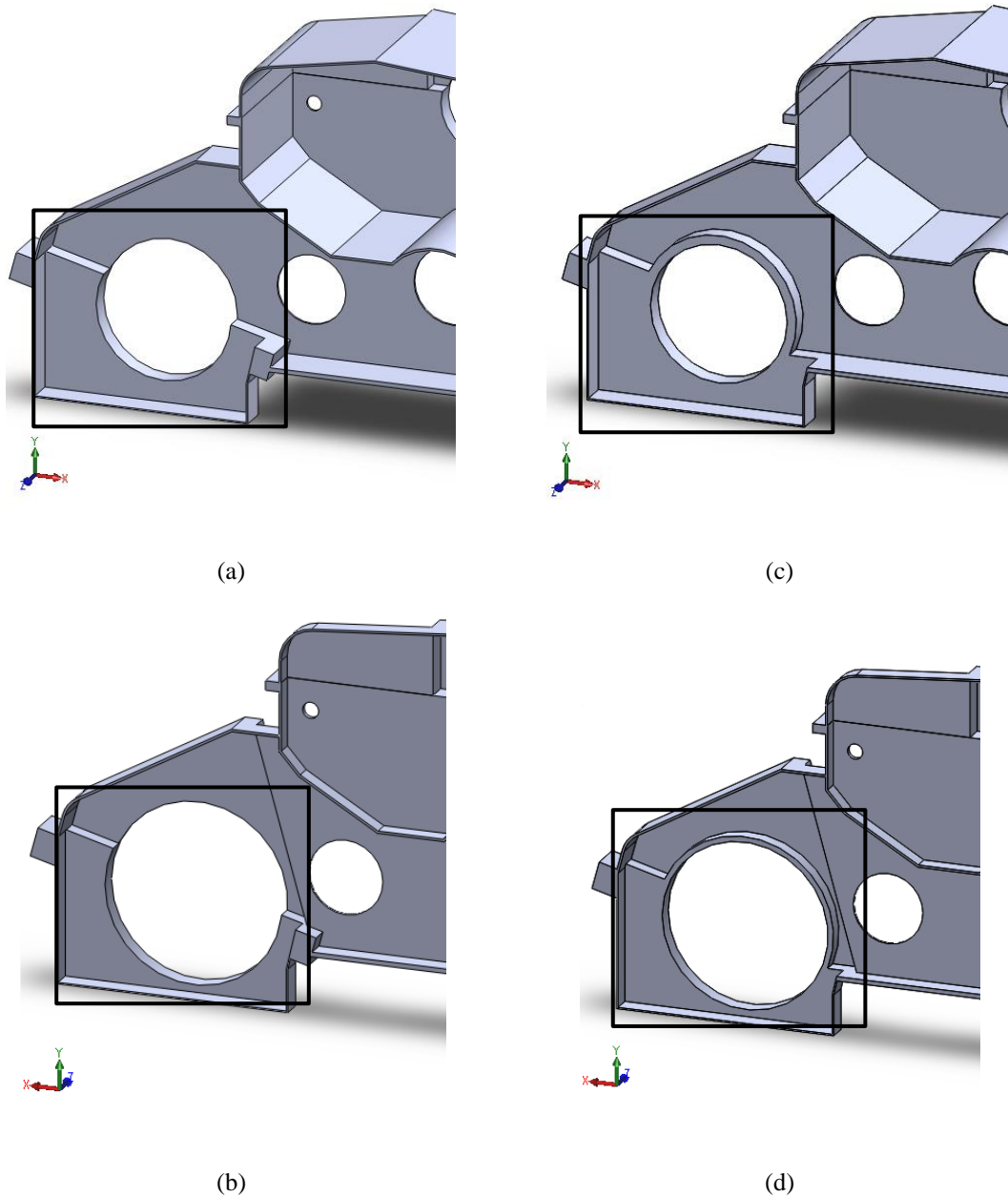


Figura 3.7 – Comparação do interior do modelo entre a quarta versão, (a) e (b) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente), e quinta a versão do modelo simplificado, (c) e (d) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente).

Na Figura 3.8 destaca-se a remoção dos furos presentes na zona superior e central do corpo.

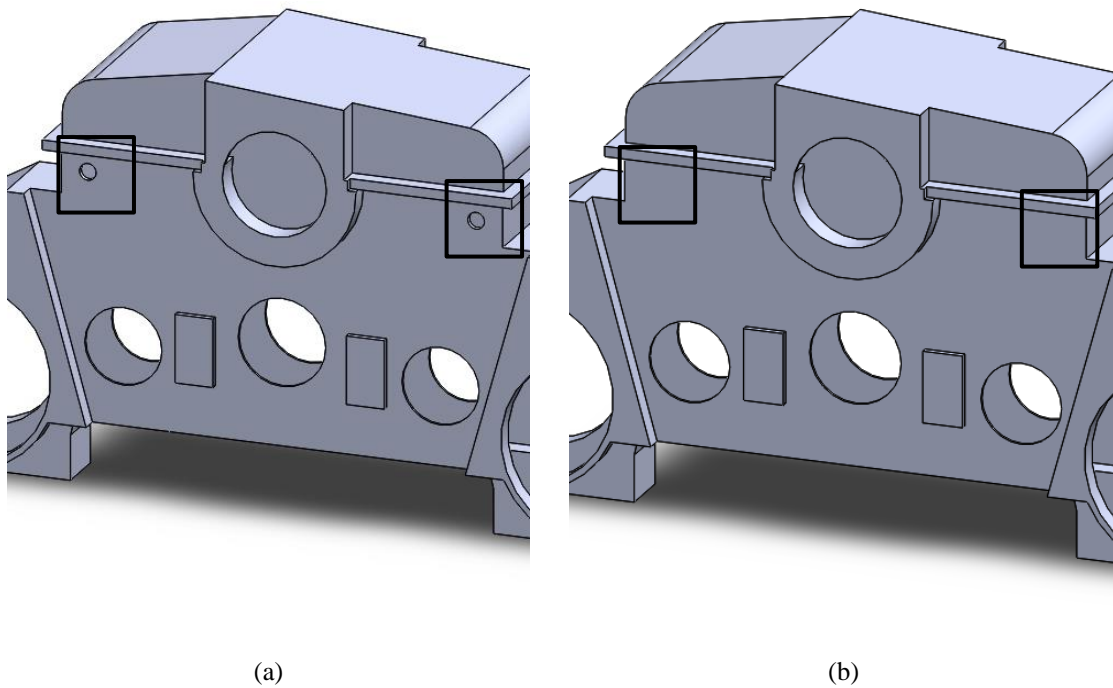


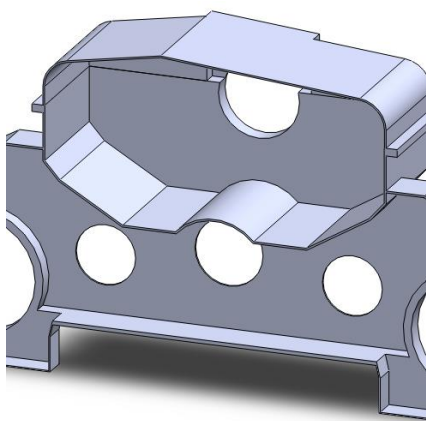
Figura 3.8 - Comparação da face frontal entre a quinta versão (a) e a sexta versão do modelo simplificado (b).

Na Figura 3.9 pode-se ver a exclusão da chapa interior divisória entre o espaço superior do corpo da caixa e do espaço inferior.

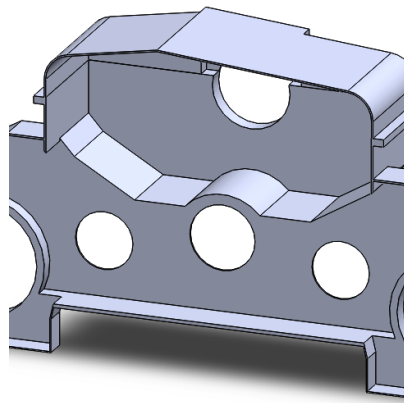
Na Figura 3.10 apresenta-se a correção feita à parede interior da zona central do corpo para não sobressair como se pode observar na Figura 3.9. Deste modo preveniu-se a necessidade de partições adicionais para a definição da malha.

Na Figura 3.11 apresenta-se a alteração realizada à geometria da parte traseira do corpo para aproximar a geometria do modelo à geometria do componente.

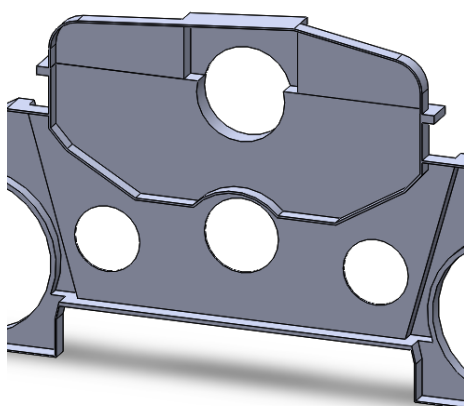




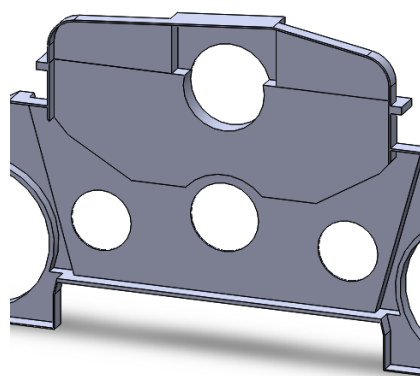
(a)



(c)

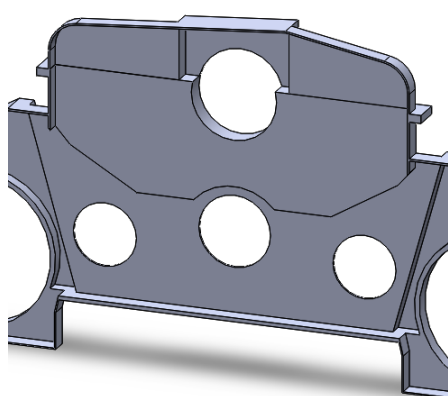


(b)

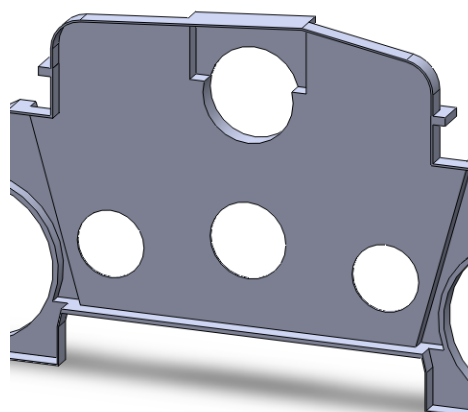


(d)

Figura 3.9 – Comparação do interior do modelo entre a sexta versão, (a) e (b) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente), e a sétima versão do modelo simplificado, (c) e (d) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente).



(a)



(b)

Figura 3.10 – Comparação do interior do modelo entre a sétima versão (a) e a oitava versão do modelo simplificado (b).

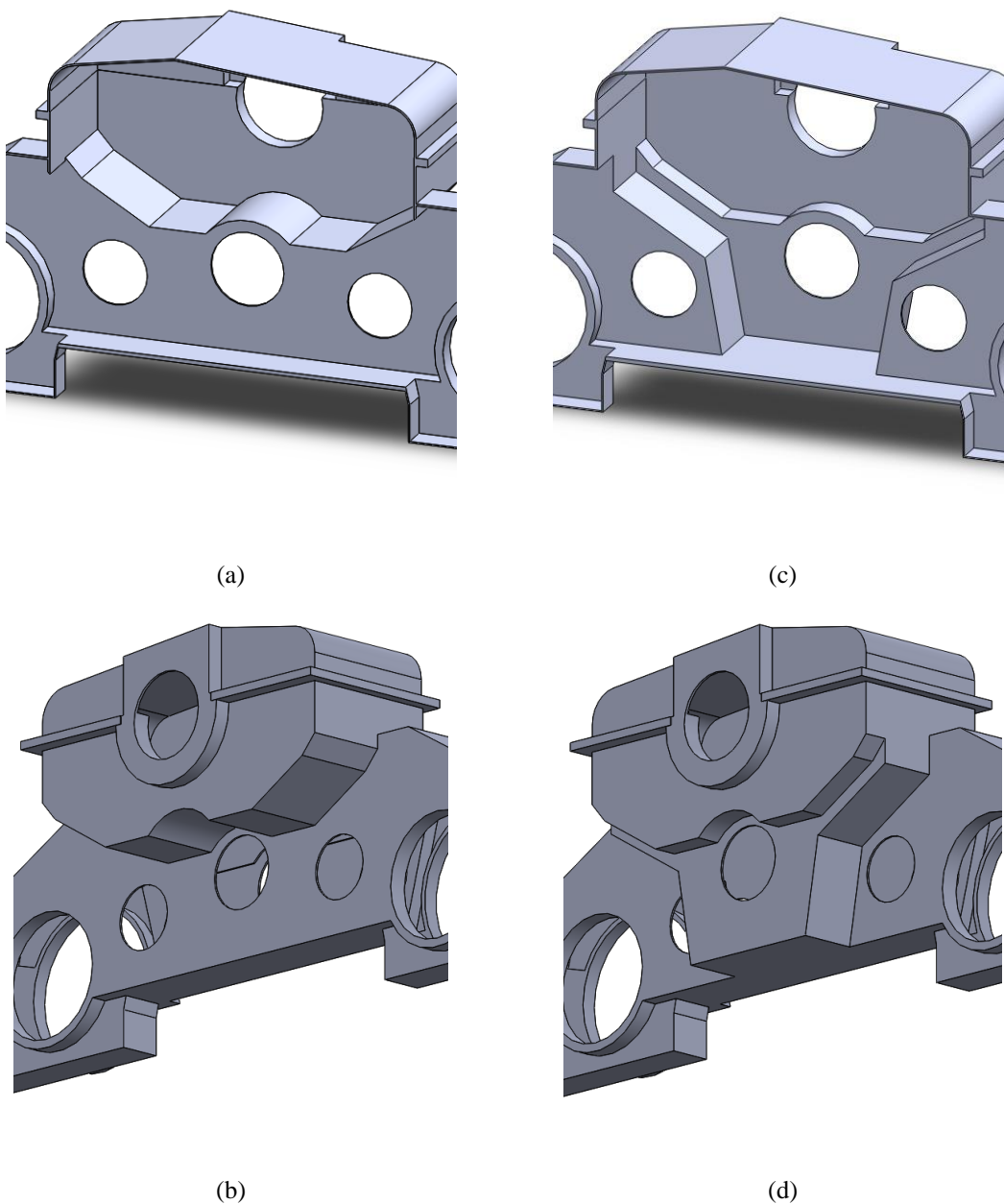
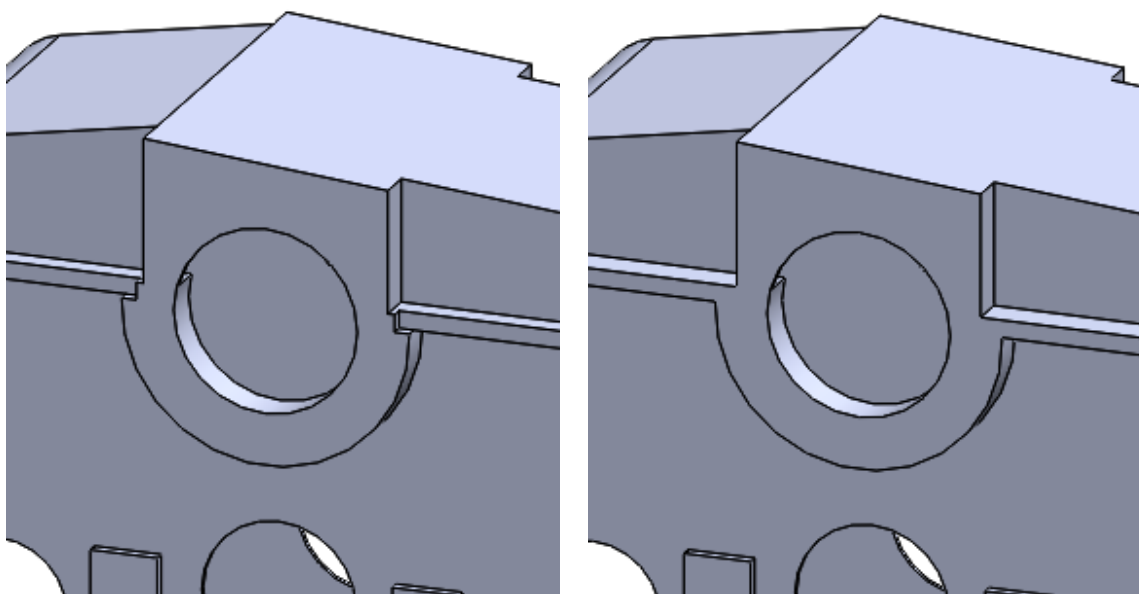


Figura 3.11 – Comparação do interior do modelo entre a oitava versão, (a) e (b) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente), e a nona versão do modelo simplificado, (c) e (d) (perspetivas frontal e traseira, respetivamente).

O último passo do processo de simplificação, retratado na Figura 3.12, consistiu em ajustar o rebordo entre a zona do corpo e a zona da tampa, para remover saliências ainda presentes nessa zona.





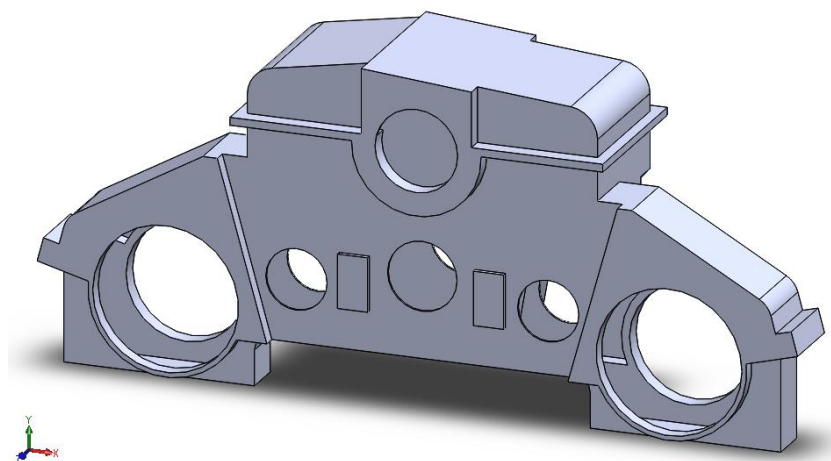
(a)

(b)

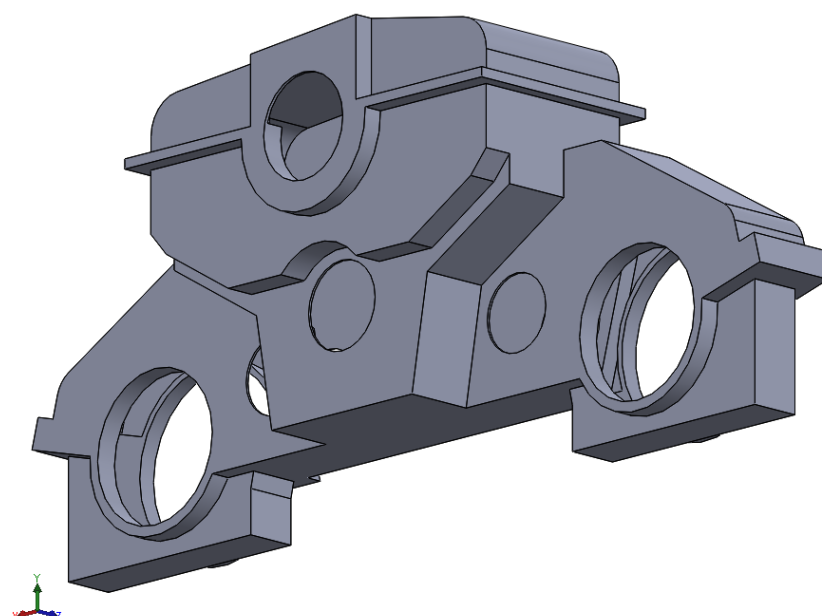
Figura 3.12 – Comparação do interior do modelo entre a nona versão (a) e a última versão do modelo simplificado (b).

O modelo simplificado finalizado tem o aspeto observado na Figura 3.13.

O resultado é um modelo que retém a geometria global do modelo original, com menor número de saliências e superfícies, e com algumas modificações para aproximarem a geometria geral do modelo simplificado à do componente real.



(a)



(b)

Figura 3.13 – Perspectiva frontal (a) e traseira (b) do modelo tridimensional simplificado finalizado do componente.

### 3.2. Processo de Discretização do Modelo

Após o processo de simplificação do modelo em Solidworks, procedeu-se à discretização do mesmo em Abaqus para posterior simulação.

Na Figura 3.14 é possível observar as linhas que constituem as partições do componente, e que definem a divisão entre chapas soldadas, possibilitando a discretização do modelo.

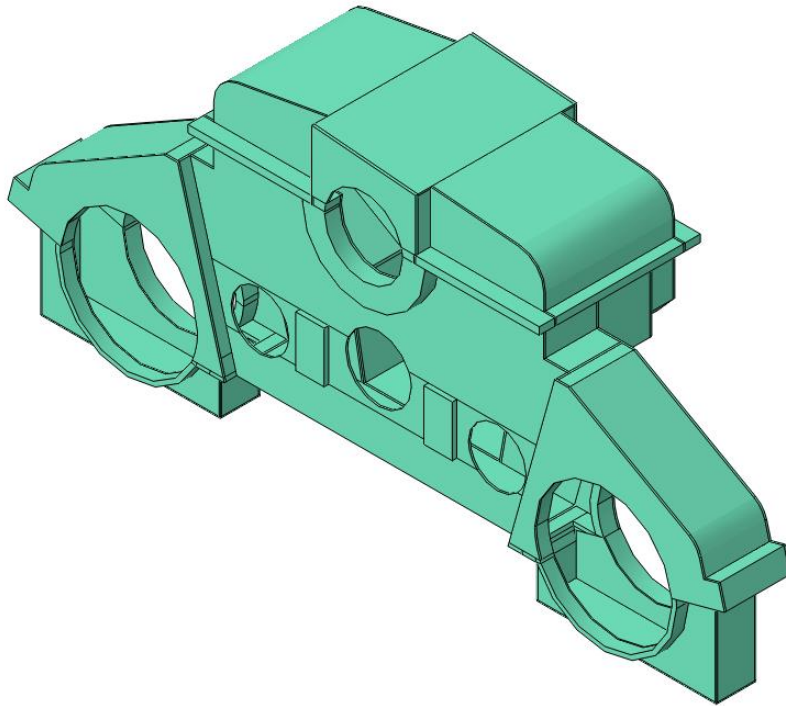


Figura 3.14 - Representação das partições efetuadas ao modelo em Abaqus.

Depois de definidas as partições, o modelo foi discretizado utilizando 4 malhas com diferentes graus de refinamento. O tipo de elemento finito escolhido foi o C3D4, sólido tetraédrico, representado na Figura 3.15. Escolheu-se este tipo de elemento por ser o que melhor se adequava às zonas de curvatura mais acentuada no modelo, e também por ser o elemento com menos pontos de integração (4 pontos de integração, nas extremidades do tetraedro), o que se traduz num menor tempo de computação durante a simulação.

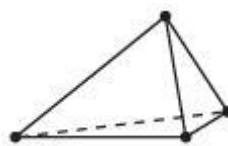


Figura 3.15 – Tipo de elemento finito utilizado, C3D4.

Nas Figuras 3.16 a 3.19 estão representadas as malhas 1, 2, 3 e 4, sendo a malha 1 a mais grosseira e a malha 4 a mais refinada.

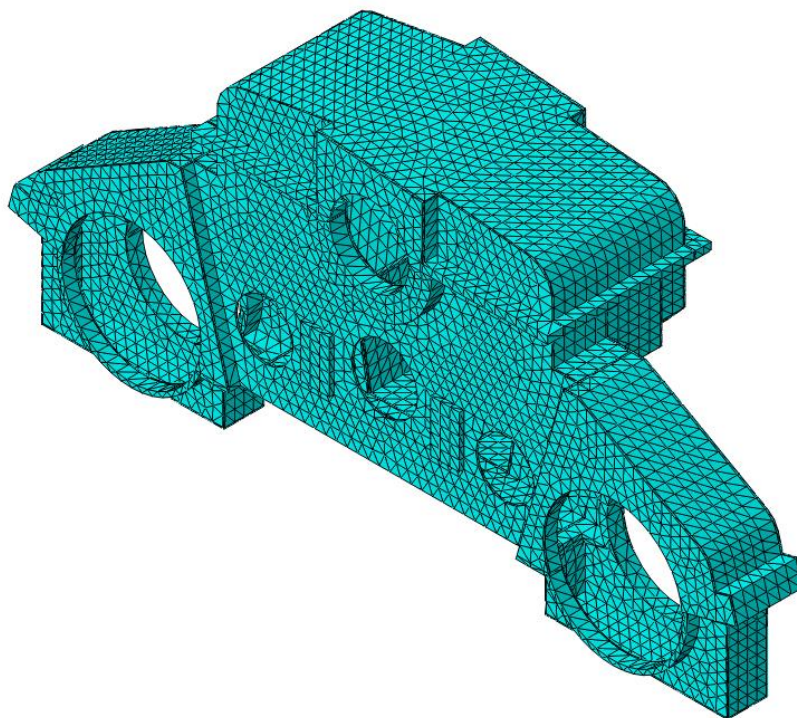


Figura 3.16 - Malha 1 do componente em Abaqus.

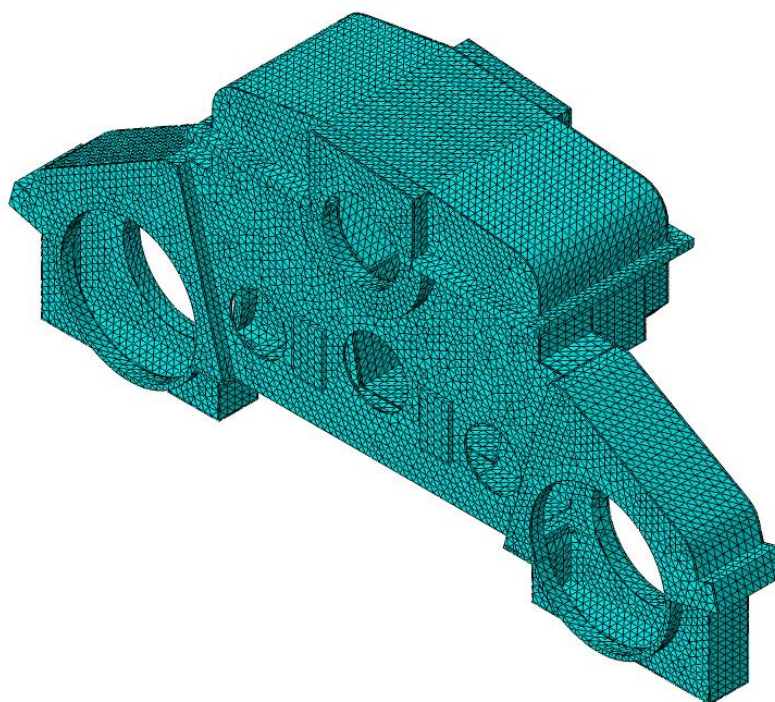


Figura 3.17 - Malha 2 do componente em Abaqus.



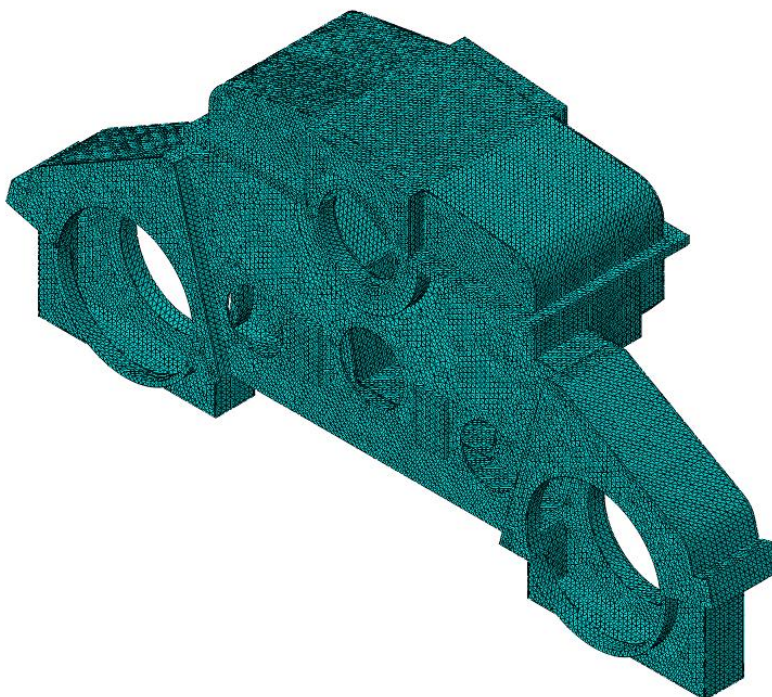


Figura 3.18 - Malha 3 do componente em Abaqus.



Figura 3.19 - Malha 4 do componente em Abaqus.

Todas as malhas possuem o mesmo tipo de elemento finito, o elemento C3D4, variando apenas no número de elementos que cada uma possui. A Tabela 3.1 reúne a informação do tipo de elemento utilizado, os números de elementos e nós que cada malha possui.

Tabela 3.1 - Resumo do número de elementos e nós das 4 malhas realizadas.

Malha	Tipo de elemento	Nº de elementos	Nº de nós
1	C3D4	35789	11363
2		75687	23772
3		188496	57512
4		792429	219842

### 3.3. Simulação

Após realização da modelação e discretização do modelo em Abaqus, foi efetuada uma análise modal para se determinarem os modos de vibração do componente simplificado, tendo como resultado as deformações, extensões e tensões, a que este está sujeito.

Para se poder executar a simulação em Abaqus foi necessário definir vários passos. Depois de definida a malha foi necessário caracterizar o material. O material definido é o ARMCO St22-3 (material constituinte do corpo do componente [1]), e para a análise modal em Abaqus foi preciso estipular os valores da massa volúmica, do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson correspondentes a esse mesmo material. Os valores atribuídos a essas propriedades são, respetivamente:  $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$ ,  $E = 198 \text{ GPa}$  e  $\nu = 0.29$ . O passo seguinte consistiu em definir as secções do modelo no *software*. Como se considerou um único material para todo o modelo, então definiu-se apenas uma secção no mesmo, o modelo por inteiro, e a esta secção associou-se o material definido, ARMCO St22-3.

Visto que no processo de simplificação do modelo do componente se unificaram as várias partes constituintes do componente, então em Abaqus não foi feita nenhuma montagem nem foram definidas interações entre tampa e corpo da caixa. Também não foi considerado amortecimento do componente relativamente aos respetivos apoios.

Para o passo seguinte foi preciso definir o tipo de análise que foi realizado ao modelo em estudo. No *software* foi escolhido o tipo de análise **Frequency**, dentro da categoria de **Linear Perturbation**. Esta é uma análise modal e determina os modos de vibração do modelo. Estipulou-se determinar os primeiros 5 modos de vibração com o *solver*: **Eigensolver Lanczos**. De seguida definiram-se os *outputs* a obter da análise, **S**, **E** e **U**, ou seja, as tensões equivalentes, extensões e deformações, segundo as direções **x**, **y** e **z**. Arbitrou-se um valor máximo para a amplitude das deformações obtidas e obteve-se desse modo as tensões máximas no componente.

Como no processo de simplificação do modelo se retiraram as partes que apoiam o corpo do componente ao bogie da locomotiva, tiveram de se definir apoios aproximados no *software* de simulação. Desse modo foram definidas 5 zonas de apoios: apoios superiores, apoios laterais, apoios frontais, encastramento central e apoio da base, como se pode ver na Figura 3.20. Os apoios superiores encontram-se nas faces laterais do corpo do componente, imediatamente por baixo da aba da tampa do mesmo. Os apoios laterais encontram-se mais abaixo em ambas as faces extremas laterais do corpo do componente. Tanto os apoios superiores como os apoios laterais condicionam a translação do modelo nas direções  $x$  e  $y$  e a rotação segundo  $z$ . O apoio da base encontra-se na base do modelo pois o componente monta na locomotiva apoiado no bogie da mesma. Deste modo o apoio da base restringe a translação do modelo na direção  $y$ . O encastramento frontal é realizado nas duas faces frontais retangulares, salientes do restante corpo. O encastramento central é realizado no furo existente entre a zona da tampa e a zona do corpo do componente. O encastramento frontal é um encastramento ao bogie da locomotiva, e o encastramento central é um encastramento a uma caixa de um veio proveniente do motor propulsor da locomotiva, ambos resultando num condicionamento da translação e da rotação nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

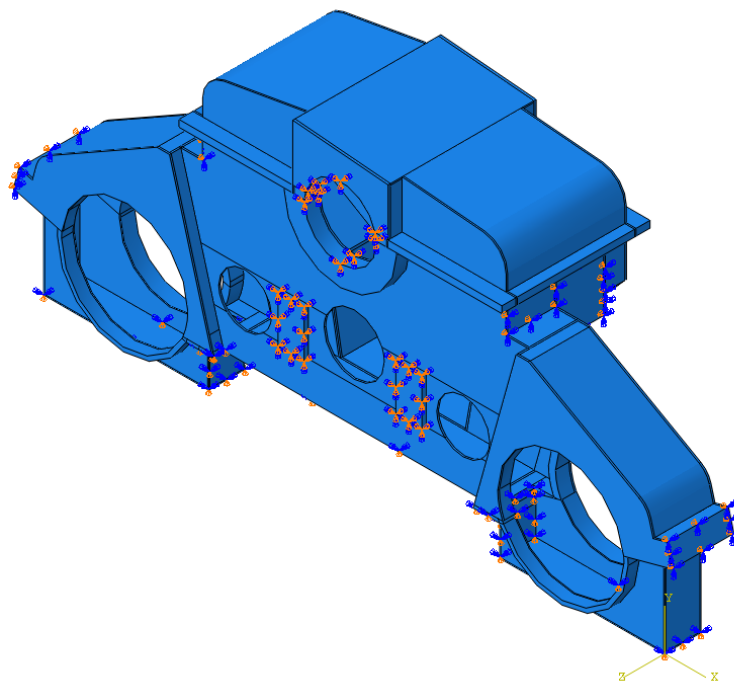


Figura 3.20 - Representação das restrições impostas ao modelo para simulação em Abaqus.

Com os parâmetros definidos realizou-se a simulação e obtiveram-se os *outputs* descritos anteriormente para cada uma das 4 malhas, ou seja, os 5 modos de vibração e as tensões, extensões e deformações do componente.

Durante a simulação o *software* dá a solução ao problema de valores e vetor próprios correspondente à Equação 3.1 [18]:

$$(\mu^2[M] + \mu[C] + [K])\{\phi\} = 0 \quad (3.1)$$

onde  $[M]$  é a matriz de massa,  $[C]$  a matriz de amortecimento,  $[K]$  a matriz de rigidez,  $\mu$  o valor próprio a obter e  $\{\phi\}$  o vetor próprio a obter. Para o presente caso não foi considerado nenhum amortecimento logo a equação reduz-se como indicado na Equação 3.2 [18]:

$$(\mu^2[M] + [K])\{\phi\} = 0 \quad (3.2)$$

A variável  $\mu$  representa  $\mu = i\omega$ , logo quando se realiza a transformação à Equação 3.2 obtém-se a Equação 3.3 [18]:

$$(-\omega^2[M] + [K])\{\phi\} = 0 \quad (3.3)$$

em que  $\omega$  representa a frequência angular, e  $\{\phi\}$  o vetor próprio a determinar, que representa os modos de vibração.

Para resolver o problema de valores e vetores próprios o Abaqus utilizou o *solver*: **Lanczos eigensolver**. Primeiro realiza a transformação indicada na Equação 3.4 [18]:

$$[M]([K] - \sigma[M])^{-1}[M]\{\phi\} = \theta[M]\{\phi\} \quad (3.4)$$

onde  $\sigma$  é a variável de deslocamento,  $\theta$  o valor próprio a obter e  $\{\phi\}$  o vetor próprio a obter. Apesar da transformação, o vetor próprio da Equação 3.4 é igual ao da Equação 3.3. O parâmetro  $\omega$  sofre a transformação apresentada na Equação 3.5 [18]:

$$\omega^2 = \frac{1}{\theta} + \sigma \quad (3.5)$$

O *solver* realiza várias séries de cálculos e cada série consiste num processo iterativo. O primeiro passo que o *solver* realiza é a transformação apresentada na Equação 3.6, que é a resultante depois da matriz ser deslocada e fatorizada na Equação 3.5 [18]:

$$([K] - \sigma_p[M])[V]_{(i+1)} = [M][V]_{(i)} \quad (3.6)$$

em que  $\sigma_p$  é a variável de deslocamento para a iteração  $p$  e  $[V]_{(i)}$  é uma matriz auxiliar de *Lanczos*. O seu número de linhas é igual ao número de variáveis do modelo de elementos finitos e o número de colunas é igual ao tamanho do bloco *Lanczos*,  $b$ . A matriz inicial,  $[V]_1$ , é um conjunto aleatório de vetores ortonormalizados pelo processo da Equação 3.7 [18]:

$$[I] = [V]_{(1)}^T[M][V]_{(1)} \quad (3.7)$$

onde  $[I]$  é a matriz identidade. De seguida o *solver* define a matriz auxiliar,  $[U]$ , como indicado na Equação 3.8 [18]:

$$[U]_{(i+1)} = [\hat{V}] - [V]_{(i+1)}\beta_i \quad (3.8)$$



onde,  $\beta_i$  é uma matriz triangular superior de dimensões  $b \times b$  e  $\beta_1 = 0$ . Depois o *solver* define a matriz auxiliar,  $\alpha_i$ , como se observa na Equação 3.9 [18]:

$$\alpha_i = [U]_{(i+1)}^T [M] [V]_{(i)} \quad (3.9)$$

De seguida define o residual do *Lanczos*,  $[R]$ , como apresentado na Equação 3.10 [18]:

$$[R]_{(i+1)} = [U]_{(i+1)} - [V]_{(i)} \alpha_i \quad (3.10)$$

Depois normaliza esse mesmo residual, tal como nas Equações 3.11 e 3.12 [18]:

$$[V]_{(i+1)} \beta_i = [R]_{(i+1)} \quad (3.11)$$

$$[I] = [V]_{(i+1)}^T [M] [V]_{(i+1)} \quad (3.12)$$

Após a normalização, o *solver* avalia a perda de ortogonalidade entre  $[V]_{(i+1)}$  e  $[V]_{(j)}$ , em que  $j = 1, 2, \dots, i-1$ , usando o método de reortogonalização parcial, e realiza reortogonalização caso seja necessário. No passo seguinte realiza uma reortogonalização local e recalcula  $[V]_{(i+1)}$  de modo a verificar a Equação 3.13 [18]:

$$[0] = [V]_{(i+1)}^T [M] [V]_{(i)} \quad (3.13)$$

Depois o *solver* dá solução à Equação 3.14, que consiste no problema de valores e vetores próprios reduzido [18]:

$$[T][S] = [S][\theta] \quad (3.14)$$

em que  $[T] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_2^T & & & \\ \beta_2 & \alpha_2 & \beta_3^T & & \\ & \beta_3 & \alpha_3 & \beta_4^T & \\ & & \beta_4 & \alpha_4 & \dots \\ & & & \dots & \dots & \beta_i^T \\ & & & & \beta_i & \alpha_i \end{bmatrix}$  e  $[S]$  e  $[\theta]$  são as matrizes dos vetores próprios e os

valores próprios do problema reduzido, respetivamente.

No passo seguinte, o *solver* determina os limites de erro na aproximação do problema. O processo iterativo de uma série de cálculos é terminado se os valores próprios da presente série forem determinados ou se a continuação dos cálculos na série se provar ineficiente, admitindo que as condições impostas à simulação não impõem problemas sobre a mesma [18].

Tendo obtido os modos de vibração do componente procedeu-se à análise dos resultados.

### 3.4. Análise de Resultados

Para cada uma das malhas de elementos finitos foi realizada uma análise modal e obteve-se os primeiros 5 modos de vibração. As Figuras 3.21 a 3.40 mostram o componente deformado segundo os modos de vibração para as 4 malhas consideradas. As deformações apresentadas têm

um fator de magnificação para poderem ser visualizadas. As cores no componente representam as tensões equivalentes de von Mises, sendo que as zonas a azul-escuro são as que sofrem uma tensão equivalente menor e as zonas a vermelho as que sofrem uma tensão equivalente maior.

Analisando as Figuras 3.21 a 3.40, observa-se que os modos de vibração 3 e 5 causam uma deformação de grande amplitude na zona da tampa. Estas deformações são mais evidentes para as malhas 3 e 4 pois estas têm um maior número de elementos. Isto evidencia que a tampa foi sujeita a deformações de elevada amplitude em diferentes modos de vibração e por isso seria esperado um tempo em serviço reduzido até à sua falha por fadiga. Por outro lado, a zona do corpo onde Morgado *et al.* [1] observaram fissuração, nos ensaios de líquidos penetrantes, não revelou tensão elevada em nenhum dos modos de vibração das malhas.

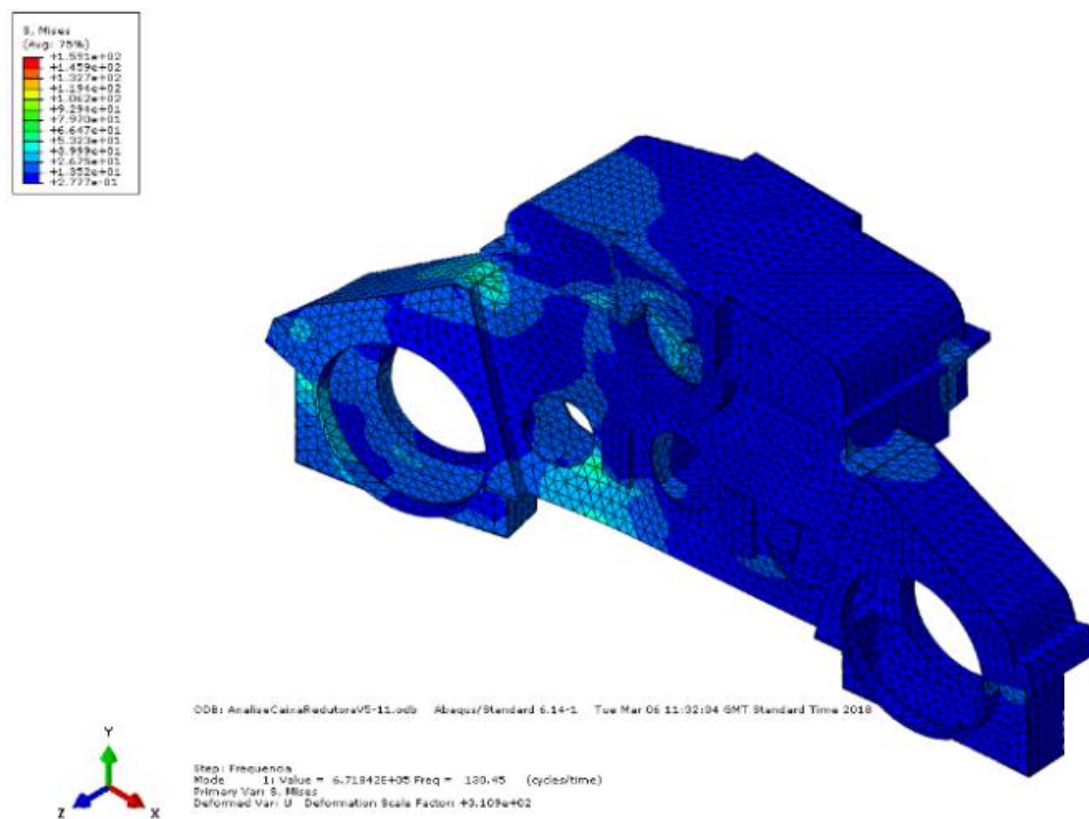


Figura 3.21 - 1º modo de vibração da malha 1.

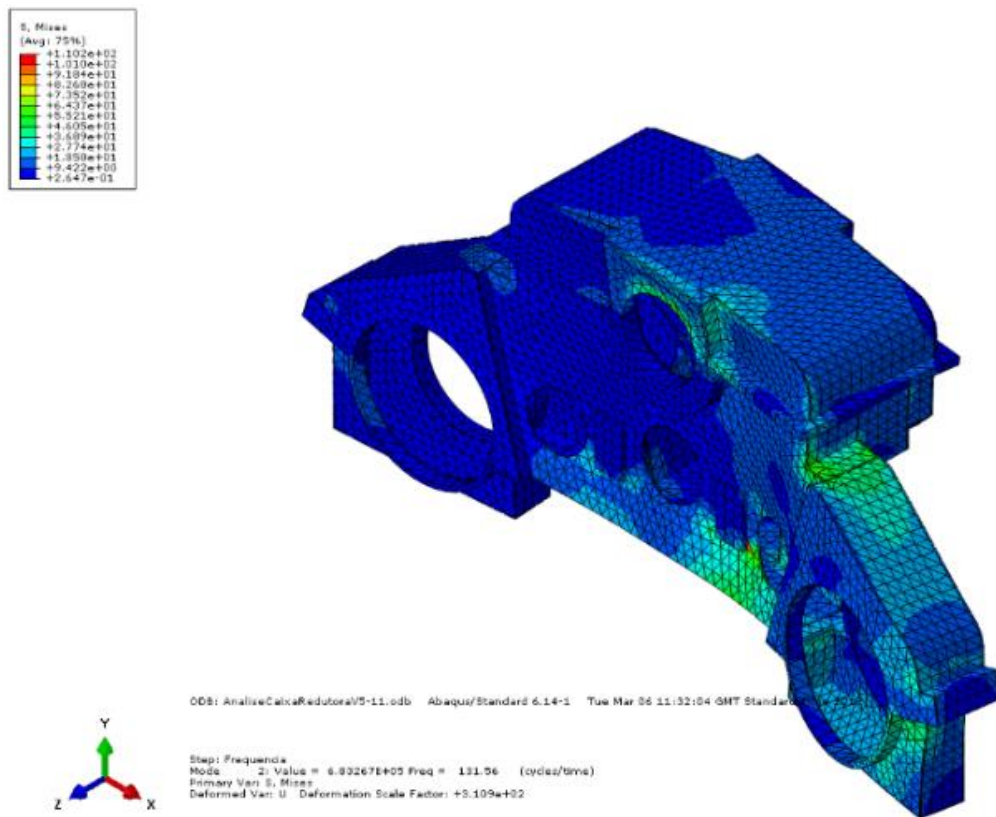


Figura 3.22 - 2º modo de vibração da malha 1.

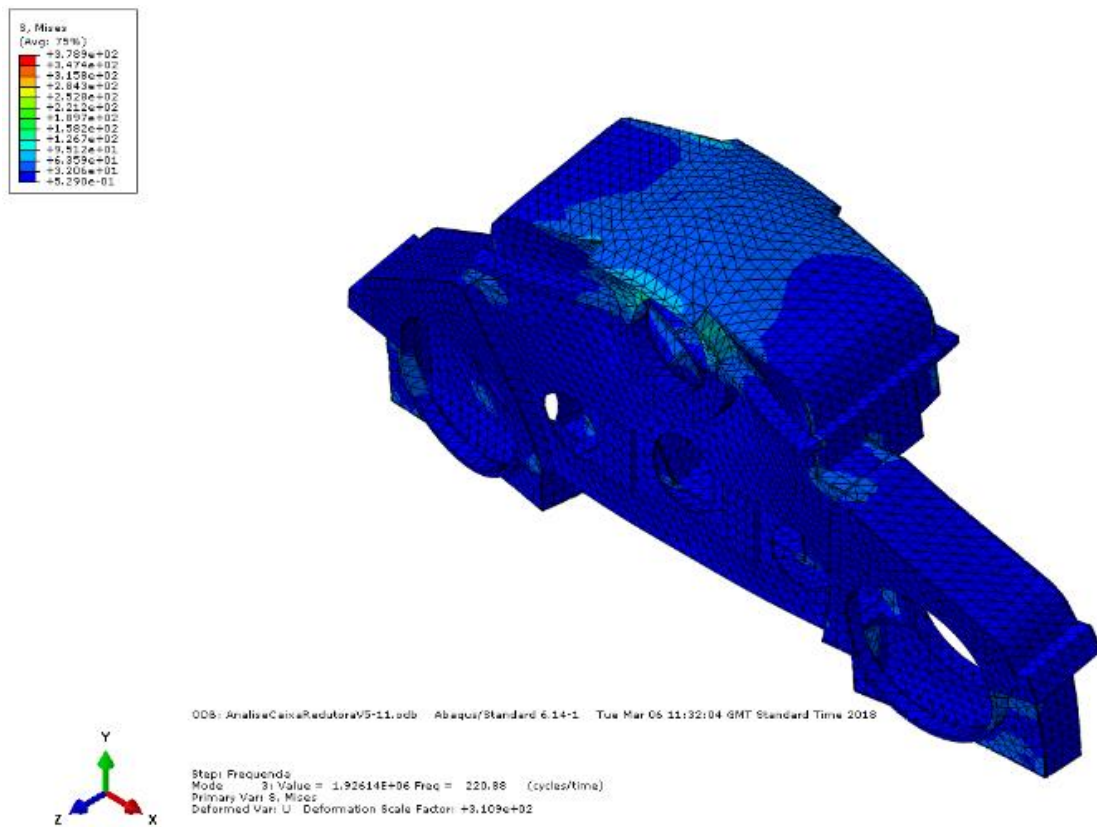


Figura 3.23 - 3º modo de vibração da malha 1.

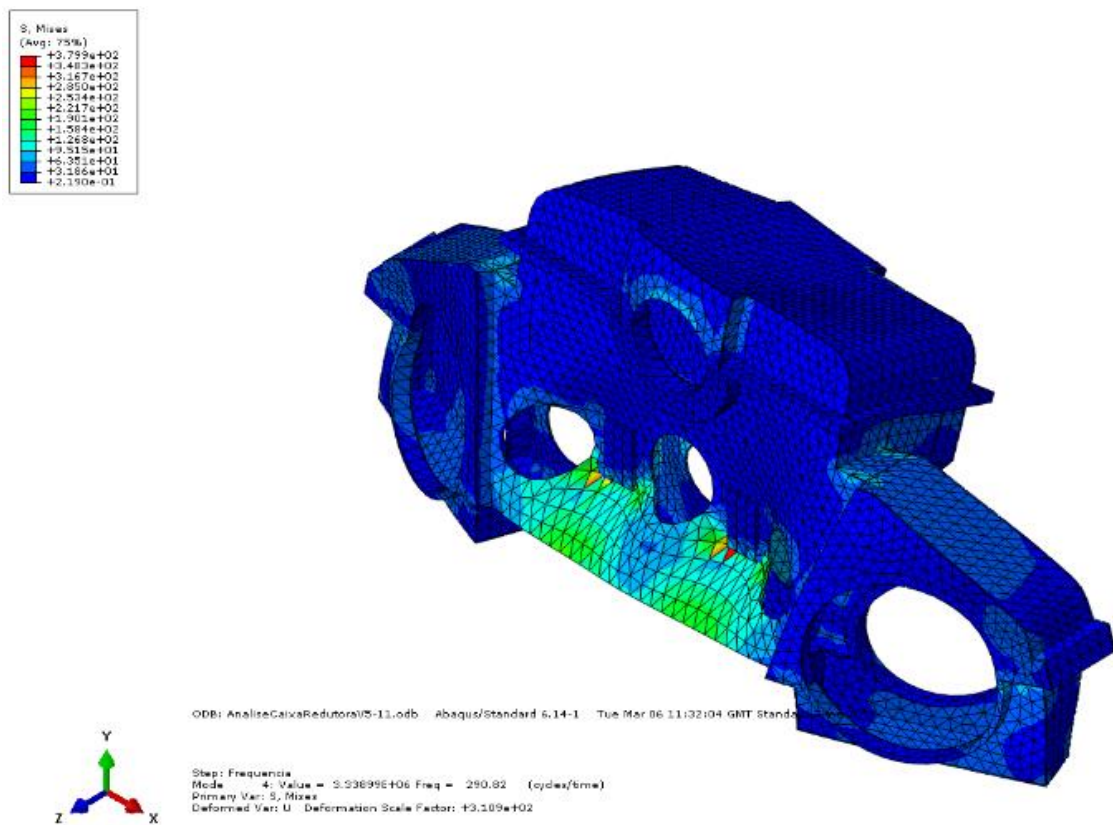


Figura 3.24 - 4º modo de vibração da malha 1.

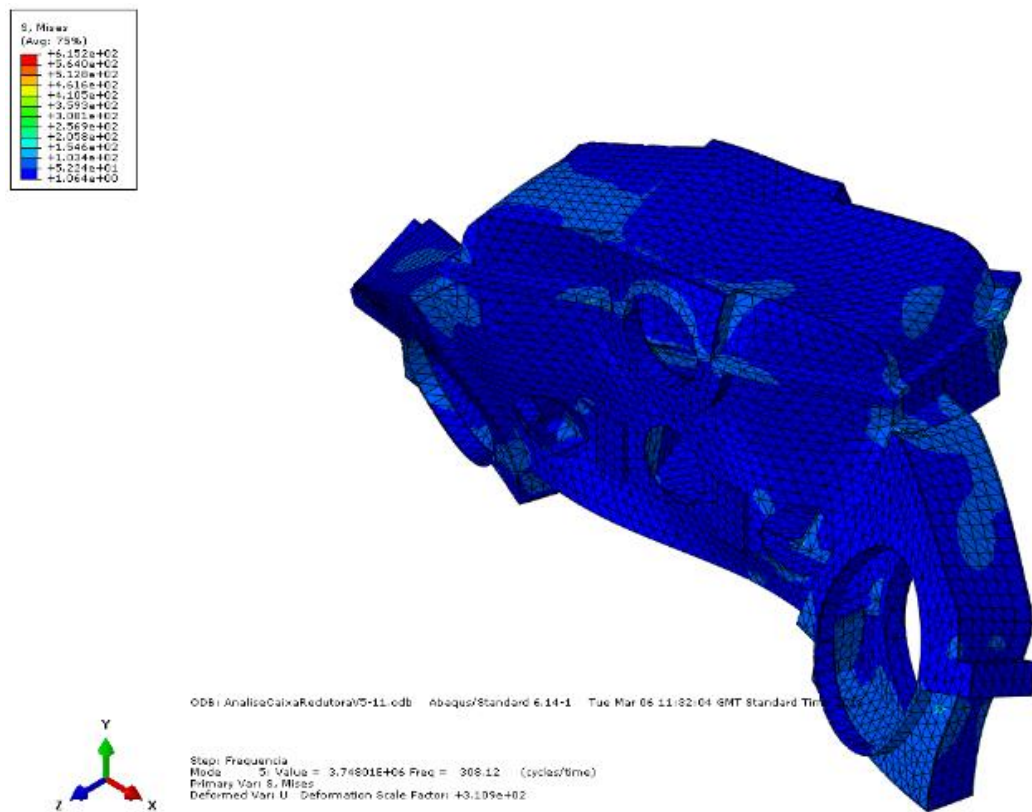


Figura 3.25 - 5º modo de vibração da malha 1.



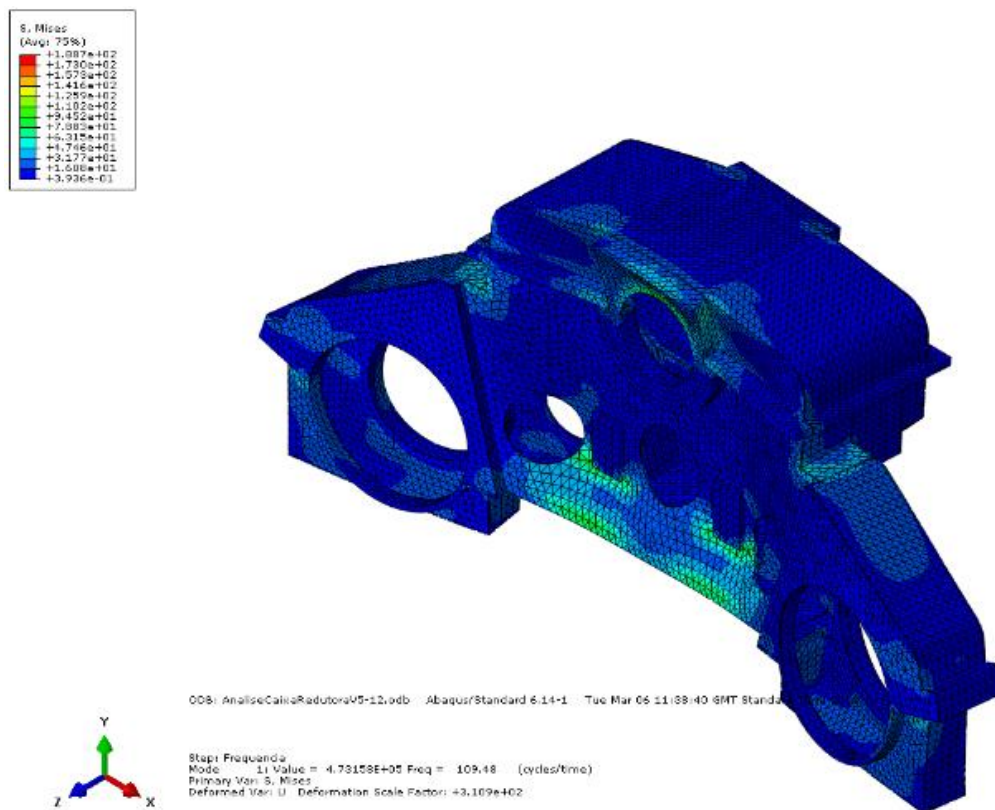


Figura 3.26 - 1º modo de vibração da malha 2.

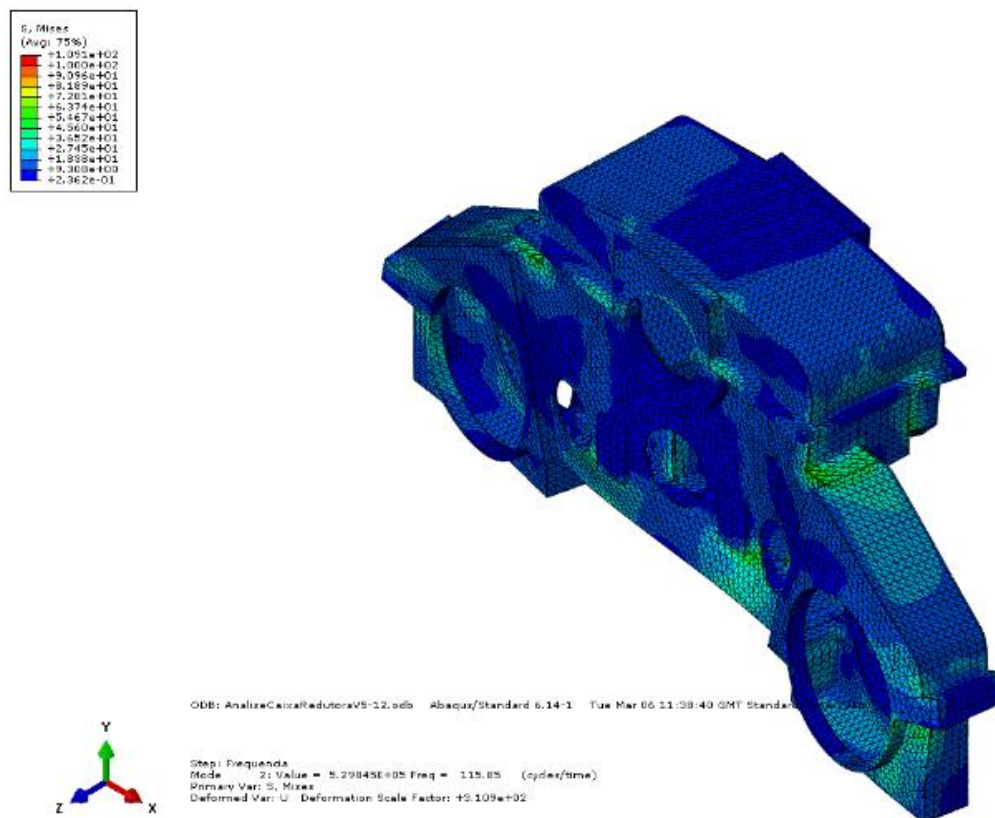


Figura 3.27 - 2º modo de vibração da malha 2.

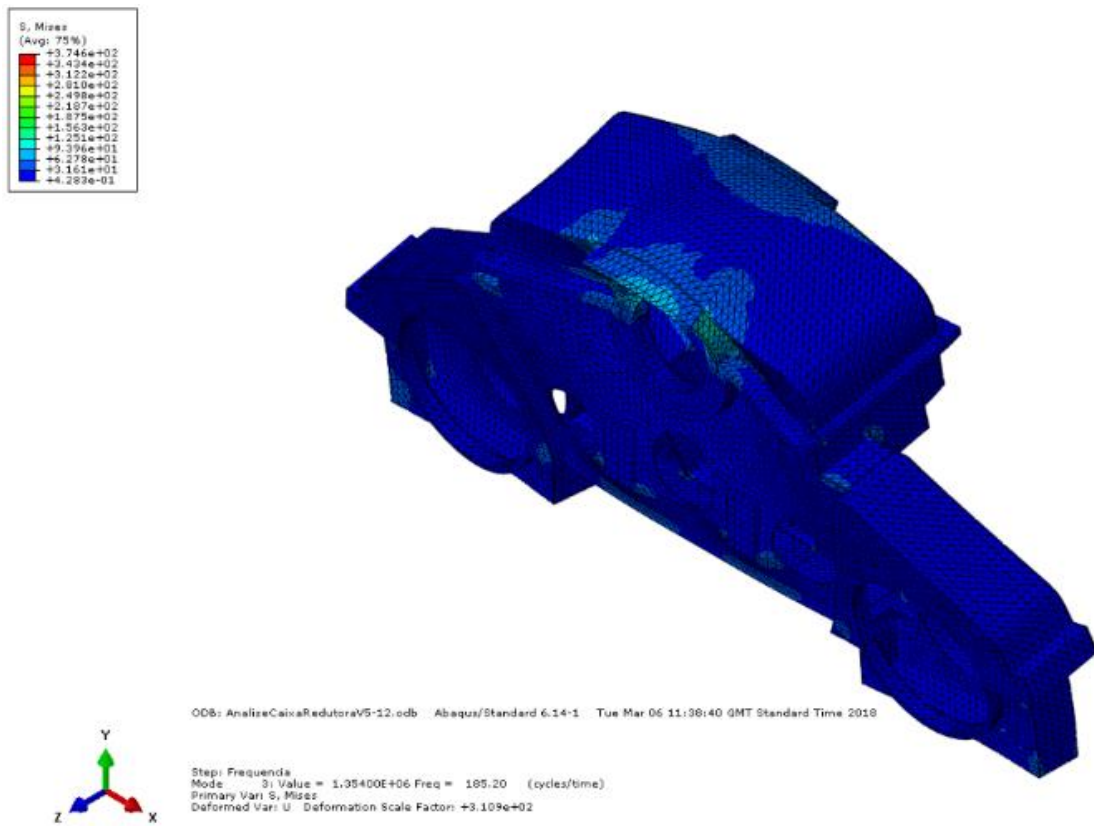


Figura 3.28 - 3º modo de vibração da malha 2.

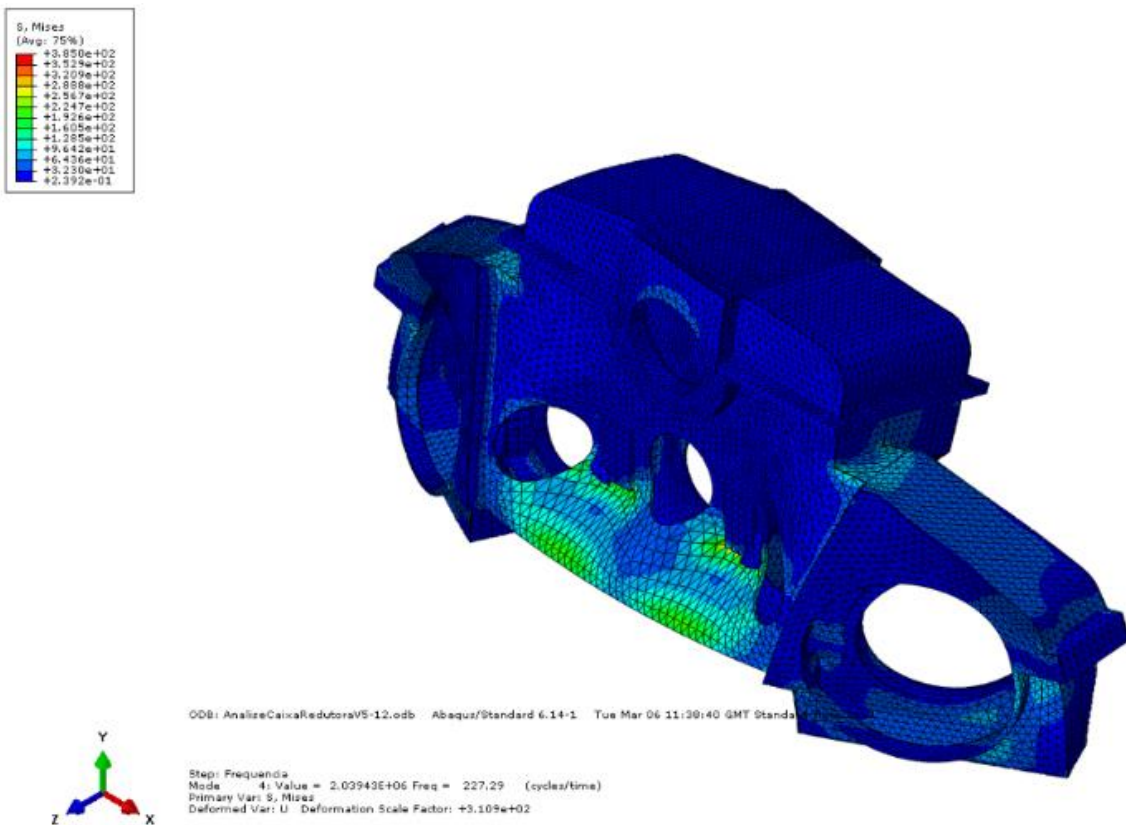


Figura 3.29 - 4º modo de vibração da malha 2.

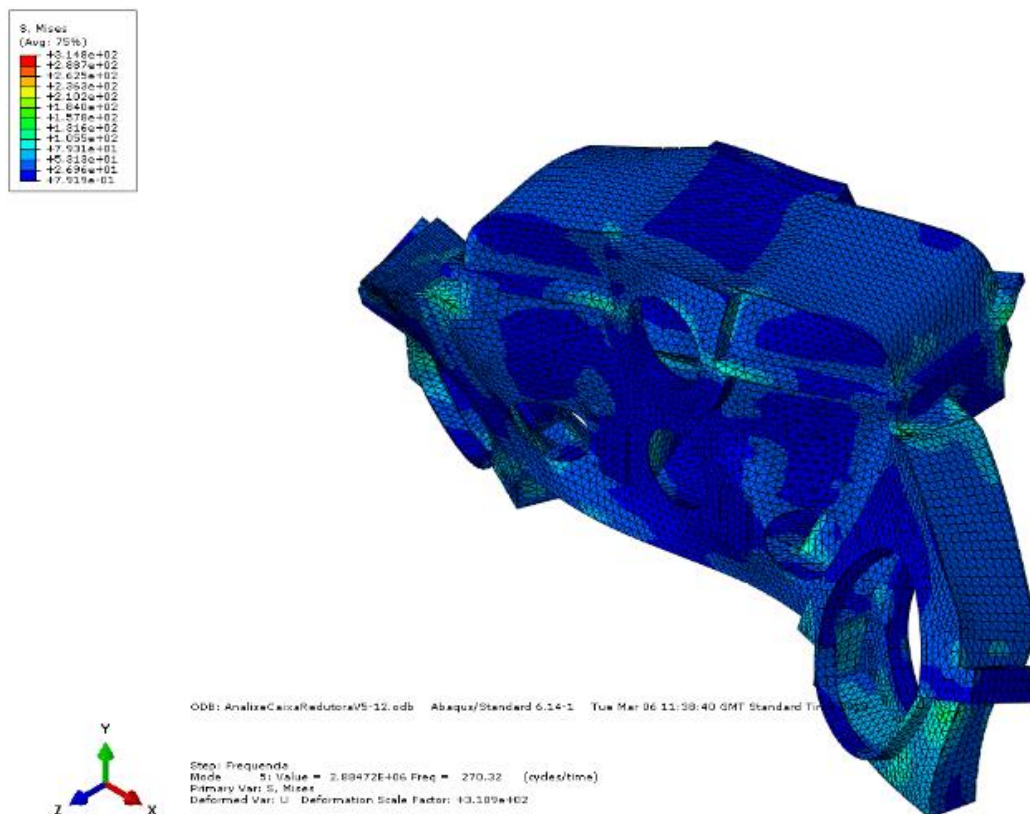


Figura 3.30 - 5º modo de vibração da malha 2.

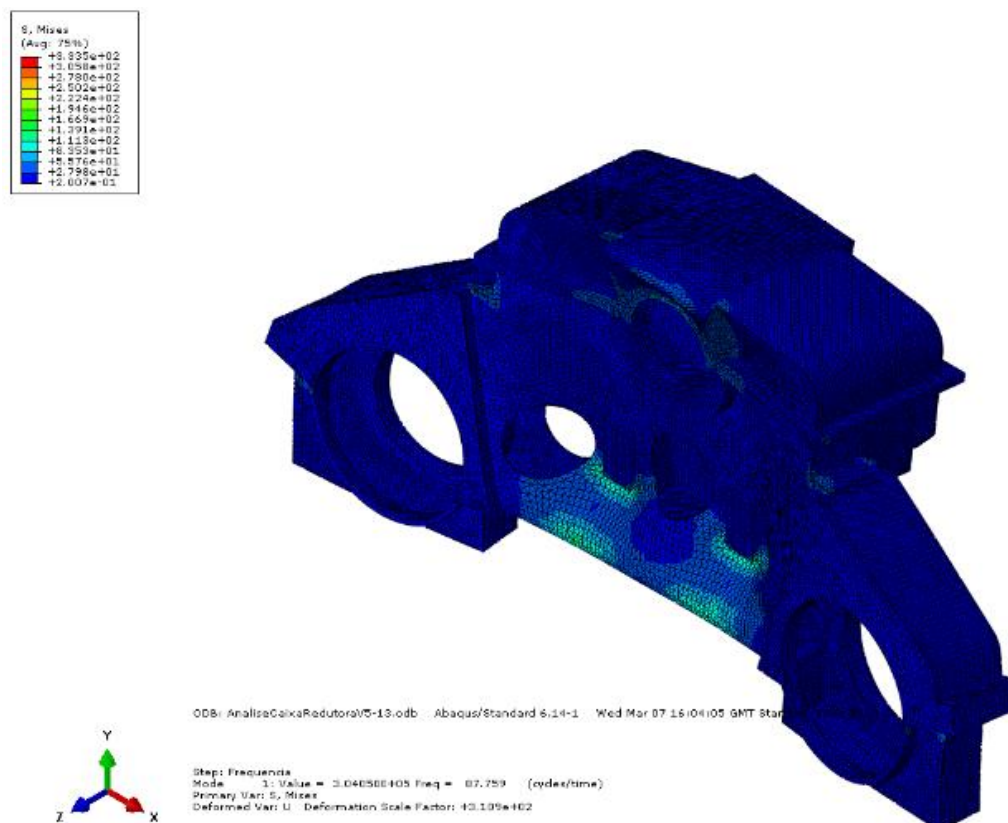


Figura 3.31 - 1º modo de vibração da malha 3.



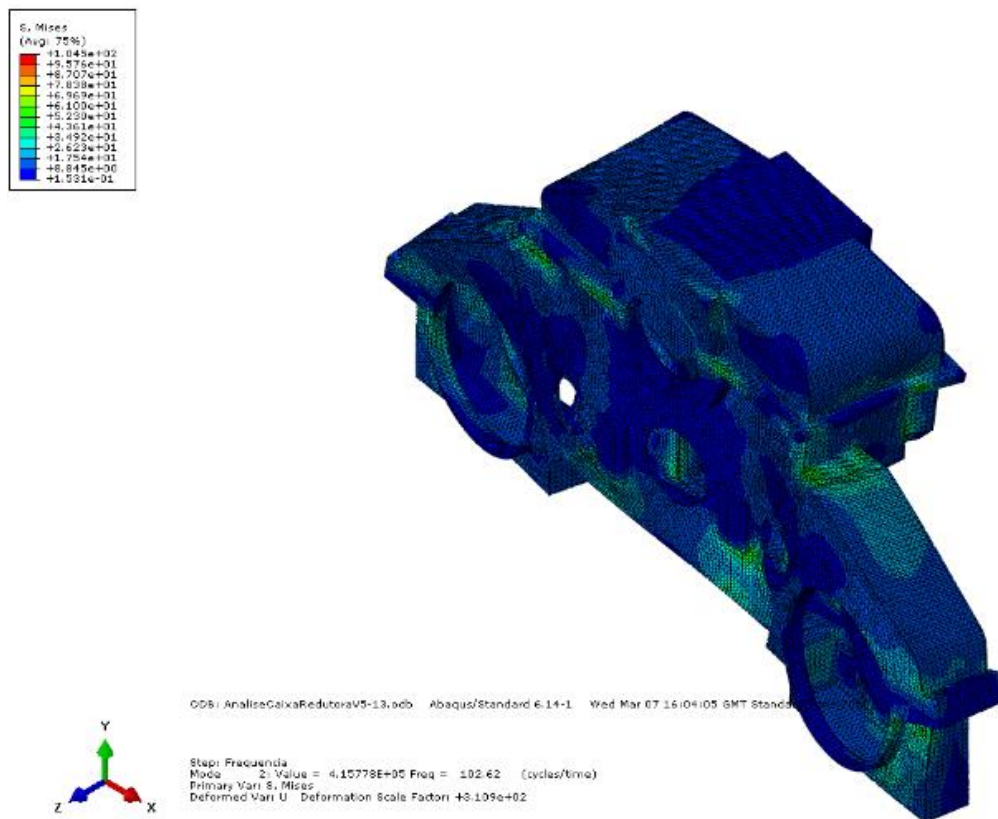


Figura 3.32 - 2º modo de vibração da malha 3.

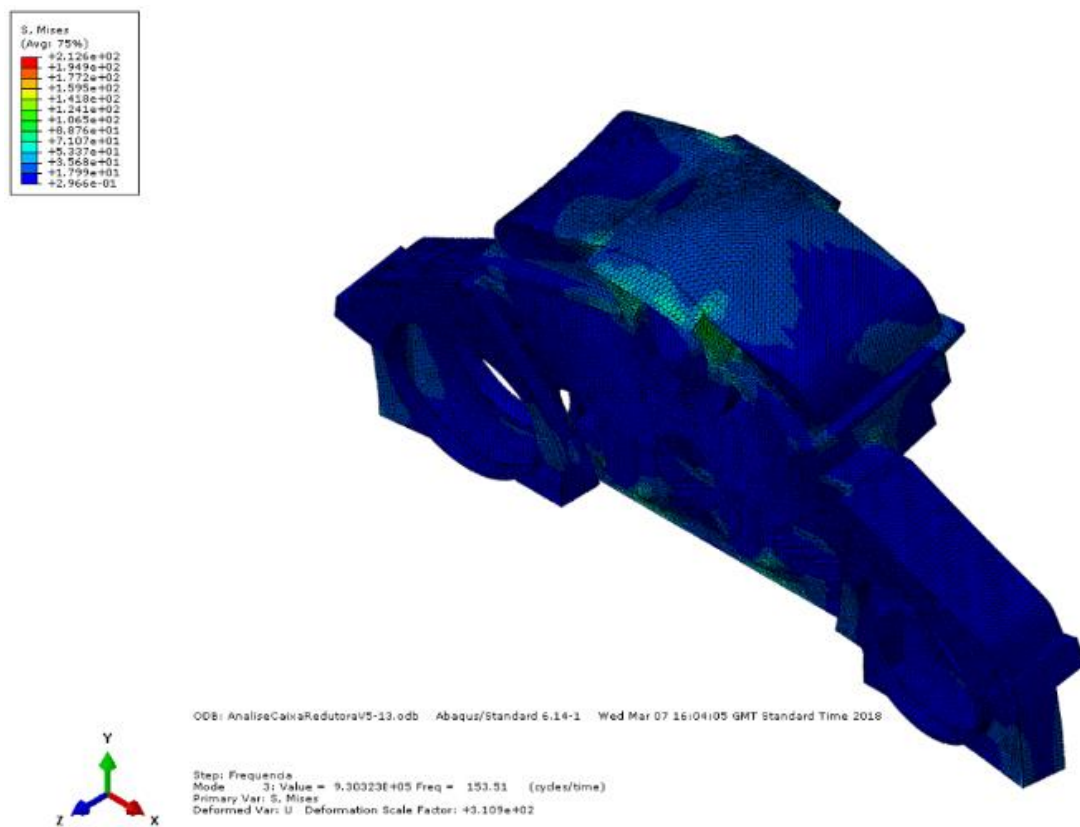


Figura 3.33 - 3º modo de vibração da malha 3.



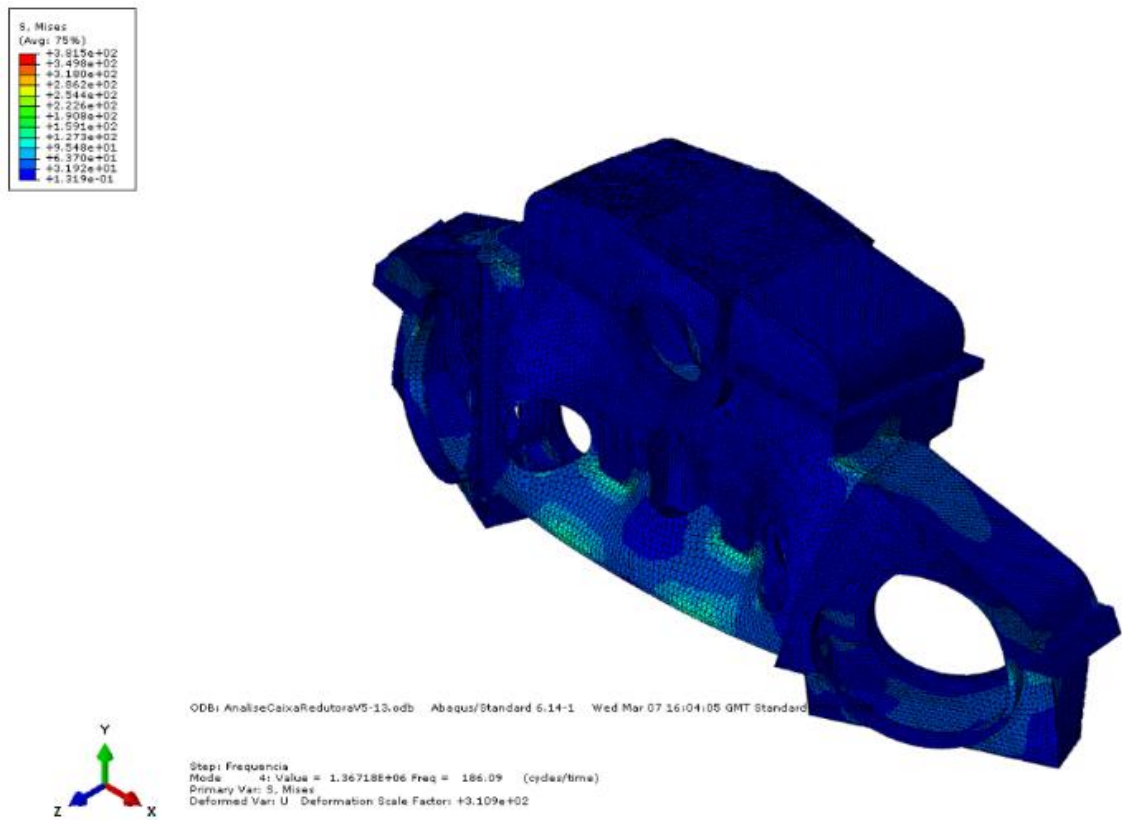


Figura 3.34 - 4º modo de vibração da malha 3.

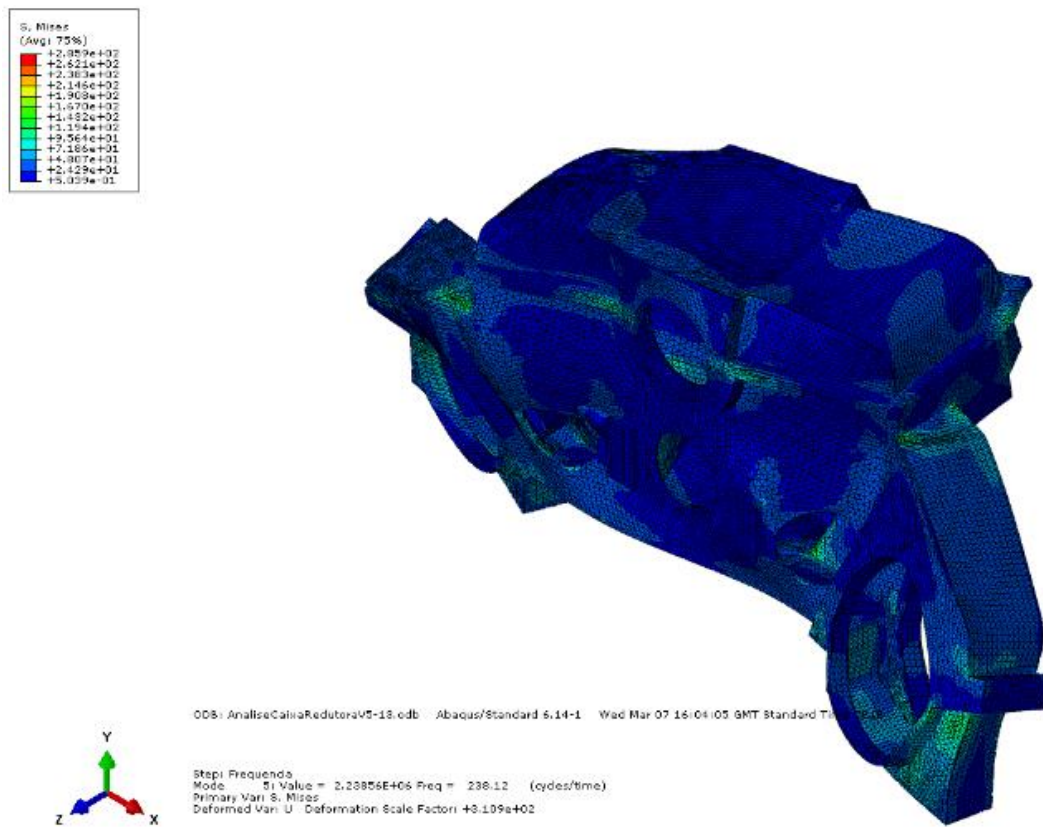


Figura 3.35 - 5º modo de vibração da malha 3.

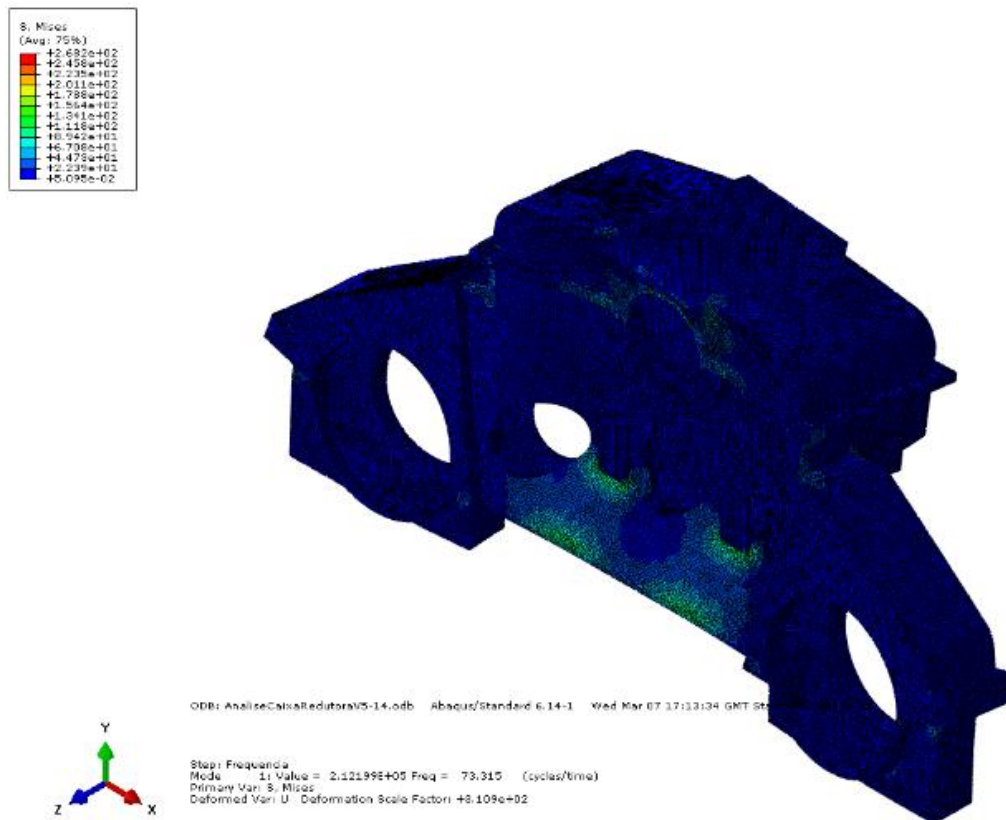


Figura 3.36 - 1º modo de vibração da malha 4.

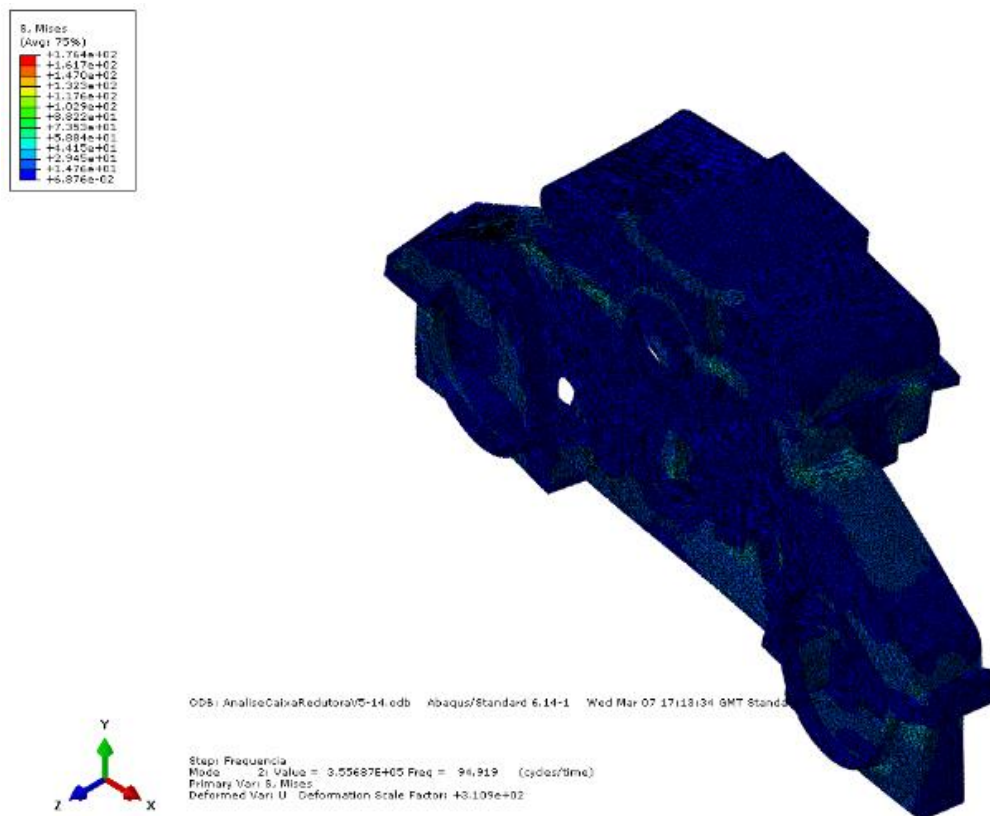


Figura 3.37 - 2º modo de vibração da malha 4.

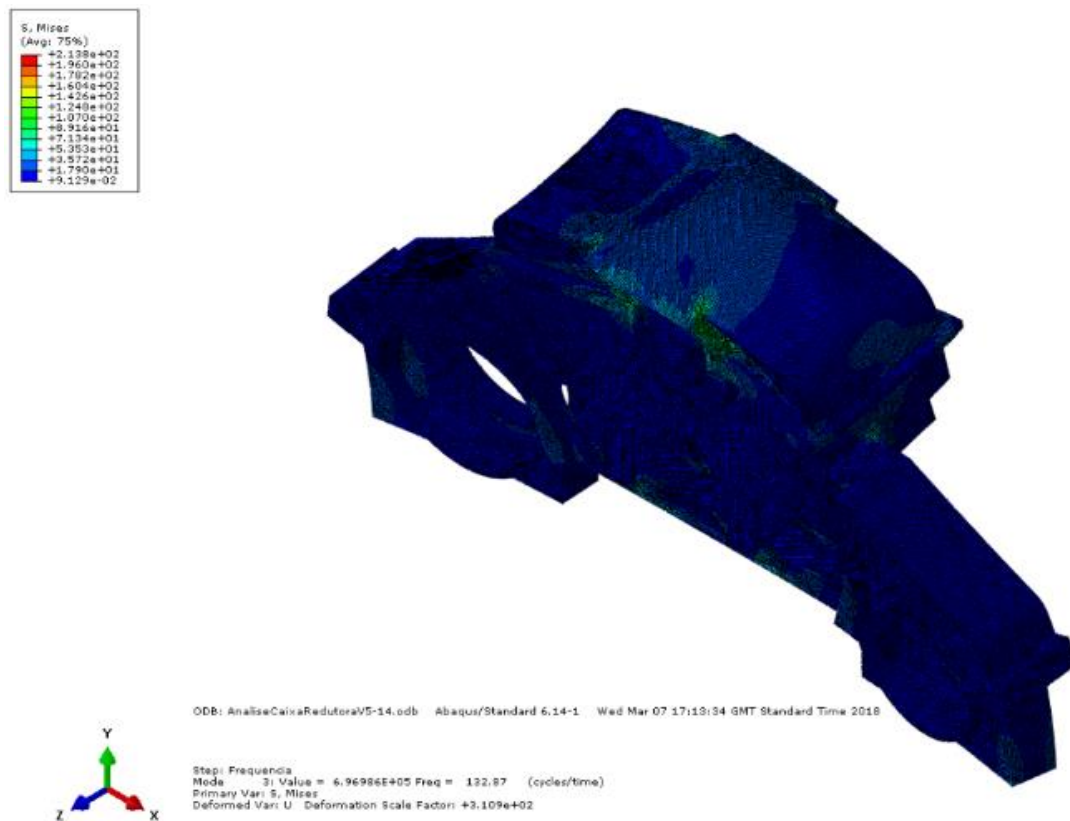


Figura 3.38 - 3º modo de vibração da malha 4.

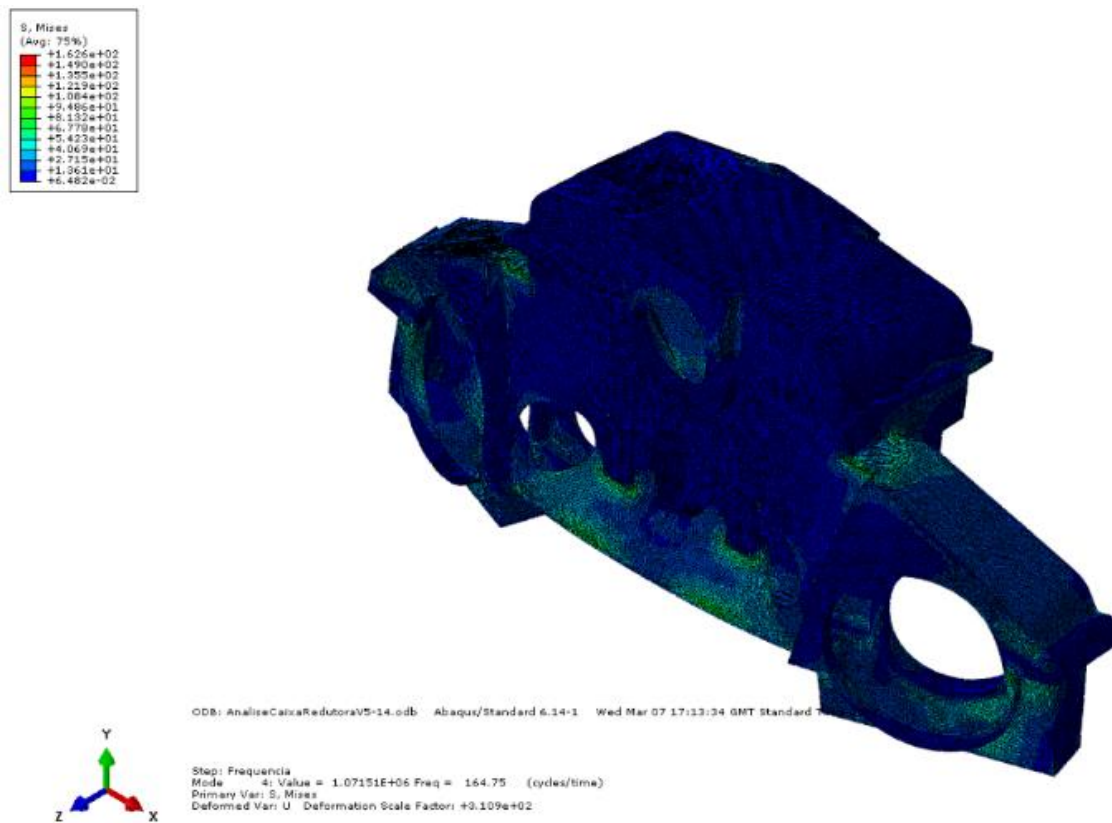


Figura 3.39 - 4º modo de vibração da malha 4.

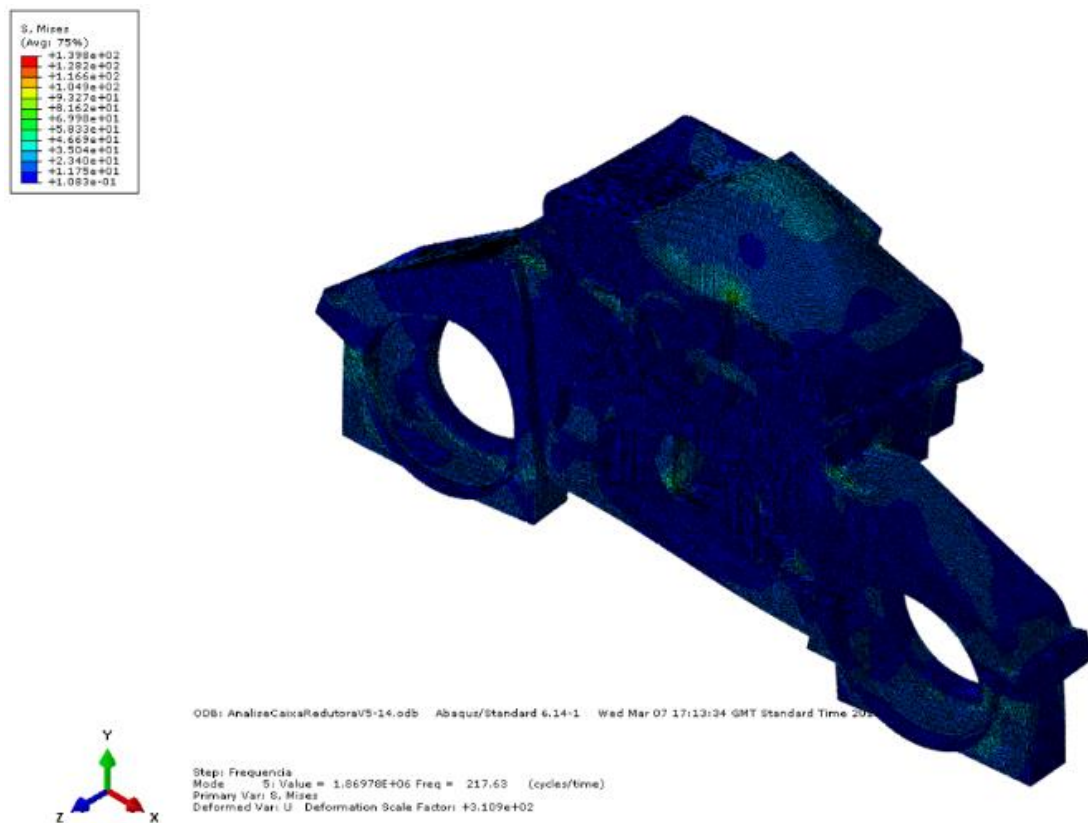


Figura 3.40 - 5º modo de vibração da malha 4.

Na Tabela 3.2 apresentam-se as tensões máximas e mínimas globais (considerando todos os elementos da respetiva malha) para a amplitude máxima de cada modo de vibração e para cada malha, assim como as frequências dos mesmos.

Tabela 3.2 - Tensões equivalentes de von Mises máximas e mínimas no componente para a amplitude máxima de cada modo de vibração, e frequência do modo de vibração, para as 4 malhas realizadas.

		Malha			
		1	2	3	4
Modo 1	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	159.1	188.7	333.5	268.2
	$\sigma_{m\acute{i}n}$ [MPa]	0.2777	0.3936	0.2007	0.05095
	$f$ [Hz]	130.45	109.48	87.759	73.315
Modo 2	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	110.2	109.1	104.5	176.4
	$\sigma_{m\acute{i}n}$ [MPa]	0.2647	0.2362	0.1531	0.06876
	$f$ [Hz]	131.56	115.85	102.62	94.919
Modo 3	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	378.9	374.6	212.6	213.8
	$\sigma_{m\acute{i}n}$ [MPa]	0.529	0.4283	0.2966	0.09129
	$f$ [Hz]	220.88	185.2	153.51	132.87
Modo 4	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	379.9	385	381.5	162.6
	$\sigma_{m\acute{i}n}$ [MPa]	0.219	0.2392	0.1319	0.06482
	$f$ [Hz]	290.82	227.29	186.09	164.75
Modo 5	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	615.2	314.8	285.9	139.8
	$\sigma_{m\acute{i}n}$ [MPa]	1.064	0.7919	0.5039	0.1083
	$f$ [Hz]	308.12	270.32	238.12	217.63

Como se pode verificar na Tabela 3.2, para o modo de vibração 5, a malha 1 apresenta a maior tensão máxima global, sendo quase o dobro do verificado na malha 2, que apresenta a segunda maior tensão máxima global para o mesmo modo de vibração. Verifica-se ainda que o modo de vibração 1 da malha 1 apresenta a menor tensão máxima global.

Ainda analisando a Tabela 3.2, verifica-se que para o modo de vibração 3 a tensão máxima é aproximadamente igual entre as malhas 1 e 2, 378.9 MPa e 374.6 MPa, respetivamente, e aproximadamente igual entre as malhas 3 e 4, 212.6 MPa e 213.8 MPa, respetivamente. Isto deve-se aos resultados das simulações das malhas 1 e 2 não apresentarem um abaulamento da tampa tão evidente quanto os resultados das malhas 3 e 4 (como pode ser observado nas Figuras 3.21 a 3.40). Para este modo de vibração, as simulações com as malhas com mais elementos apresentam o resultado que mais se aproxima do caso do componente em serviço, porque este fissurou nessa mesma zona da tampa.

Avaliando os valores das frequências dos modos de vibração apresentados na Tabela 3.2 é possível observar que o valor da frequência para cada modo de vibração diminui com o aumento do número de elementos, o que possivelmente indica que o valor da frequência em serviço para cada modo de vibração é menor que os valores apresentados na tabela. Os valores das frequências são possivelmente ainda menores em serviço que os determinados, porque os apoios foram retirados ou simplificados drasticamente no processo de simplificação do modelo, e isso resultou em zonas de maior área apoiadas ou encastradas em Abaqus, pelo que introduziu ao modelo uma maior rigidez durante a simulação que a rigidez do componente em serviço. Outro fator que

influenciou para o mesmo foi o facto de não se ter considerado a massa total real do componente, pois além de ter sido simplificado (e ter assim reduzido a massa total considerada), não foi considerada a massa das engrenagens ou dos lubrificantes dentro da caixa. O resultado de uma menor rigidez e de uma maior massa seria uma menor frequência para cada modo de vibração determinado. Isto indica então que as frequências dos modos de vibração do componente em serviço foram provavelmente menores que as determinadas nas simulações numéricas.

Para a obtenção de  $\Delta K$  pelas equações da norma BS 7910 [2], foi necessário obter as tensões de membrana e de flexão na zona do defeito do corpo e na zona do defeito da tampa. Para isso, em Abaqus realizou-se uma linearização de tensões considerando o modo de vibração com as tensões na zona do corpo mais elevadas e o modo de vibração com as tensões na zona da tampa mais elevadas, respetivamente. Considerou-se que o modo de vibração 5 da malha 3 era o mais crítico para a zona fraturada do corpo e o modo de vibração 5 da malha 4 o mais crítico para a zona fraturada da tampa. Considerou-se o modo de vibração de malhas diferentes de modo a majorar as tensões consideradas para os cálculos de  $\Delta K$  realizados em Octave.

Para cada processo de linearização em Abaqus foi preciso definir um conjunto de pontos na zona do defeito. O conjunto de pontos define um *path*. O *path* delineado foi um segmento de reta no qual se centrou o defeito e que estendeu em 1 cm para cada lado do defeito. Para esse *path* foram determinadas as tensões de membrana, flexão, membrana + flexão e de pico.

Na Tabela 3.3 encontram-se os resultados da linearização de tensões na zona do defeito do corpo para o modo de vibração 5 da malha 3.

Tabela 3.3 - Tensões linearizadas do caso mais crítico na zona do defeito do corpo.

Zona do defeito no corpo	Critério de Tensão Máxima [MPa]	Critério de Tensão Equivalente von Mises [MPa]
$\sigma_{membrana, méd}$	15.5583	16.5613
$\sigma_{(membrana+flexão)_1}$	15.6738	16.7655
$\sigma_{(membrana+flexão)_2}$	15.4776	16.4092
$\sigma_{pico_1}$	0.242018	0.282538
$\sigma_{pico_2}$	0.325263	0.31572
$\sigma_{flexão_1}$	0.1155	0.2042
$\sigma_{flexão_2}$	0.0807	0.1521
$\sigma_{flexão, méd}$	0.0174	0.02605

Na Tabela 3.4, em semelhança à Tabela 3.3, apresentam-se os resultados da linearização de tensões na zona do defeito da tampa para o modo de vibração 5 da malha 4.

Tabela 3.4 - Tensões linearizadas do caso mais crítico na zona do defeito da tampa.

Zona do defeito na tampa	Crítério de Tensão Máxima [MPa]	Crítério de Tensão Equivalente von Mises [MPa]
$\sigma_{membrana, \text{ méd}}$	11.0869	10.6318
$\sigma_{(membrana+flexão)_1}$	9.25715	8.64104
$\sigma_{(membrana+flexão)_2}$	13.4555	13.24
$\sigma_{pico_1}$	2.14428	2.31538
$\sigma_{pico_2}$	1.59697	1.66005
$\sigma_{flexão_1}$	1.82975	1.99076
$\sigma_{flexão_2}$	2.3686	2.6082
$\sigma_{flexão, \text{ méd}}$	0.269425	0.30872

Os valores da tensão de flexão nos pontos 1 e 2 (pontos extremos do *path* definido) e os valores médios da tensão de flexão apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4 não foram obtidos diretamente pelo processo de linearização do Abaqus. As tensões de flexão nos pontos 1 e 2 foram determinadas através dos cálculos apresentados nas Equações 3.15 e 3.16, respetivamente:

$$\sigma_{flexão_1} = \left| \sigma_{(membrana+flexão)_1} - \sigma_{membrana, \text{ méd}} \right| \quad (3.15)$$

$$\sigma_{flexão_2} = \left| \sigma_{(membrana+flexão)_2} - \sigma_{membrana, \text{ méd}} \right| \quad (3.16)$$

Para se obter o valor da tensão de flexão média realizou-se o cálculo da Equação 3.17:

$$\sigma_{flexão, \text{ méd}} = \left| \frac{\sigma_{(membrana+flexão)_1} + \sigma_{(membrana+flexão)_2}}{2} - \sigma_{membrana, \text{ méd}} \right| \quad (3.17)$$

Os valores das tensões apresentados na Tabela 3.3 e 3.4 encontram-se em valor absoluto, tal como indicado nas Equações 3.15 a 3.17.

Sabendo que o defeito presente na zona do corpo se encontra junto de um cordão de soldadura, foi preciso determinar os fatores de concentração de tensões de membrana e flexão ( $k_{t_{membrana}}$  e  $k_{t_{flexão}}$ ) para esse defeito, para poder aplicá-los nas equações da norma BS 7910 [2]. Para saber esses fatores de concentração de tensões foi realizada uma outra linearização de tensões para uma zona do corpo mais afastada da zona do cordão de soldadura, denominada de zona nominal. Este processo de linearização foi realizado para o modo de vibração 5 da malha 3, tal como o processo de linearização do caso mais crítico da zona do defeito do corpo. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Tensões linearizadas na zona nominal do caso mais crítico do defeito do corpo.

Zona nominal do defeito no corpo	Critério de Tensão Máxima [MPa]	Critério de Tensão Equivalente von Mises [MPa]
$\sigma_{membrana, \text{ méd}}$	15.2915	14.2626
$\sigma_{(membrana+flexão)_1}$	15.3503	14.3458
$\sigma_{(membrana+flexão)_2}$	15.2334	14.1825
$\sigma_{pico_1}$	0.115662	0.251126
$\sigma_{pico_2}$	0.115922	0.268646
$\sigma_{flexão_1}$	0.0588	0.0832
$\sigma_{flexão_2}$	0.0581	0.0801
$\sigma_{flexão, \text{ méd}}$	0.00035	0.00155

Depois de obtidas as tensões na zona nominal do corpo, afastada da soldadura, foi então calculado o valor do fator de concentração de tensões para a tensão de membrana e para a tensão de flexão, tal como indicado nas Equações 3.18 e 3.19:

$$k_{t_{membrana}} = \frac{\sigma_{(membrana, \text{ méd})_{defeito}}}{\sigma_{(membrana, \text{ méd})_{nominal}}} \quad (3.18)$$

$$k_{t_{flexão}} = \frac{\sigma_{(flexão, \text{ méd})_{defeito}}}{\sigma_{(flexão, \text{ méd})_{nominal}}} \quad (3.19)$$

Os valores obtidos para os fatores de concentração de tensões são  $k_{t_{membrana}} = 1.1613$  e  $k_{t_{flexão}} = 16.25$ , para o defeito na zona do corpo.





## Capítulo 4 - Método Analítico

Para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , do componente ferroviário, elaboraram-se 12 rotinas no *software* Octave que conjugaram diferentes equações da norma BS 7910 [2], tendo em conta diferentes parâmetros referentes à posição e geometria do defeito considerado e referentes aos esforços presentes nesses pontos.

### 4.1. Rotinas em Octave

Cada rotina consiste num conjunto de equações da norma BS 7910 [2], que conjuga equações e parâmetros específicos do caso em análise. As rotinas criadas encontram-se descritas no parágrafo seguinte. Os códigos das mesmas encontram-se no “Anexo A”.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 encontram-se os esquemas representativos das rotinas criadas, divididos em dois conjuntos de rotinas. Na Figura 4.1 apresenta-se o **Conjunto A** de rotinas, que contém os parâmetros  $\theta$ ,  $a$  e  $c$  na forma de vetores e independentes entre si, e na Figura 4.2 o **Conjunto B** de rotinas, que contém  $\theta$  e  $a$  também na forma de vetores e independentes entre si, mas  $c$  é função de  $a$  dentro de cada rotina. O parâmetro  $a$  representa a altura total de um defeito superficial, e metade da altura de um defeito embebido, e o parâmetro  $c$  representa metade do comprimento total tanto para o defeito superficial como para o defeito embebido. O parâmetro  $\theta$  representa a direção de propagação, em radianos, para a qual se determina a gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ . Estes parâmetros, assim como os restantes necessários para o funcionamento das rotinas, são descritos mais em pormenor no subcapítulo “4.2. Parâmetros”.

É de salientar que o que diferencia os dois conjuntos de rotinas é a independência ou não de  $c$  relativamente a  $a$ . Na base dos esquemas representados nas Figuras 4.1 e 4.2 encontram-se os nomes das rotinas realizadas.

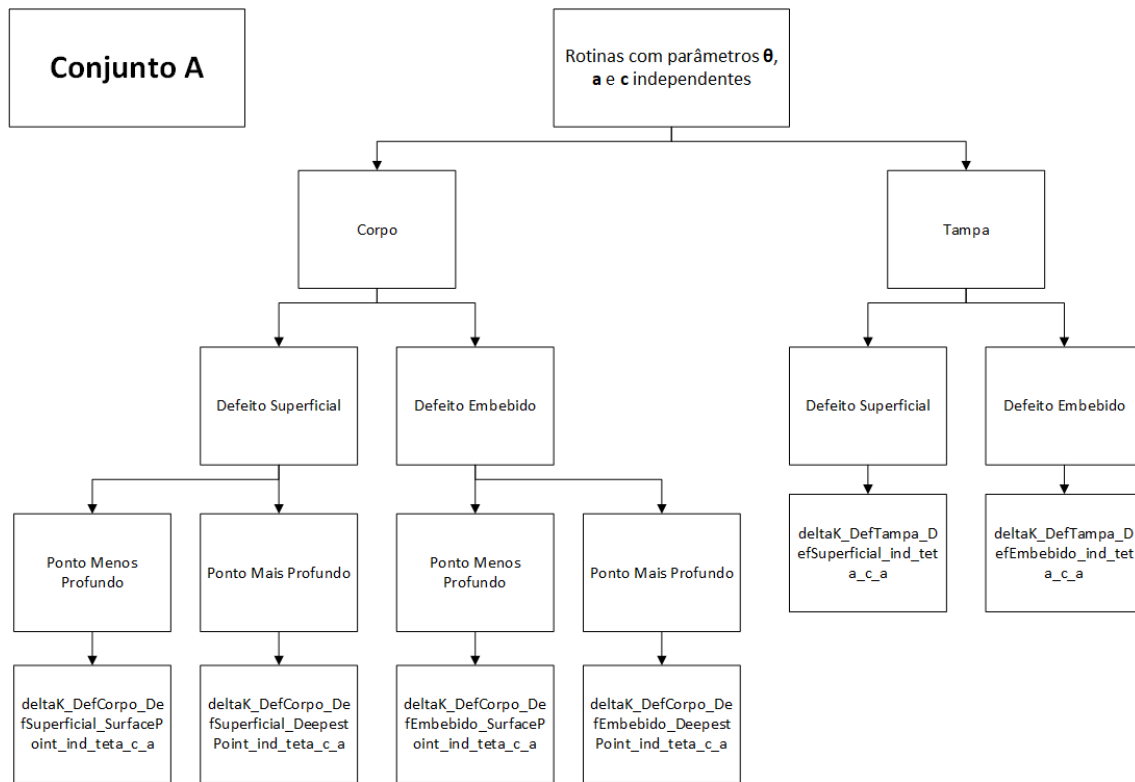


Figura 4.1 - Esquema representativo do **Conjunto A** de rotinas realizadas, considerando  $\theta$ ,  $a$  e  $c$  independentes.

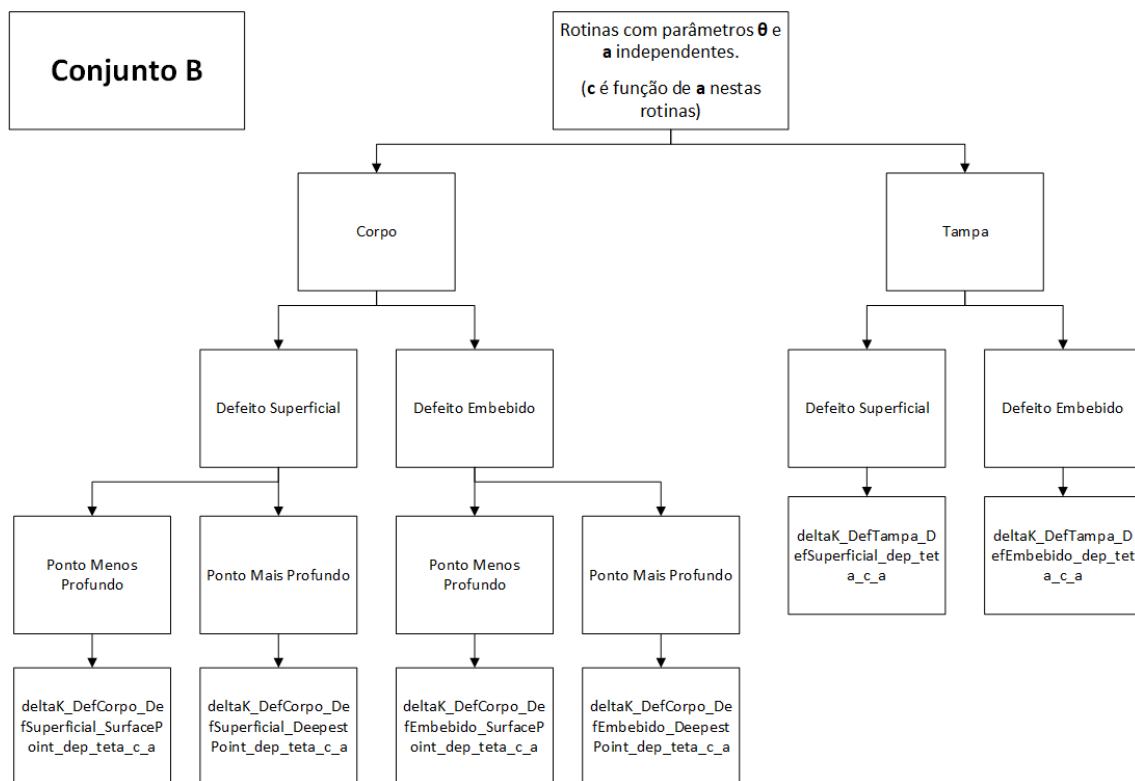


Figura 4.2 - Esquema representativo do **Conjunto B** de rotinas realizadas, considerando  $\theta$  e  $a$  independentes. Neste conjunto  $c$  é definido como função de  $a$ .

O defeito no corpo encontrava-se junto a um cordão de soldadura (localizado na posição da roseta 3 das Figuras 1.4 e 1.5) localizado na raiz do cordão. A norma distingue o valor de  $\Delta K$  para o ponto mais profundo e para o ponto menos profundo de um defeito localizado num cordão de soldadura [2], e é por esse motivo, que nesta dissertação, as rotinas relativas ao defeito no corpo possuem uma divisão adicional em relação às rotinas criadas para o defeito na tampa (localizado na posição da roseta 1 das Figuras 1.4 e 1.5).

As rotinas do **Conjunto A** foram realizadas considerando os parâmetros  $\theta$ ,  $a$  e  $c$  do defeito independentes para ser possível obter resultados sobre a evolução de  $\Delta K$  com a variação de  $a$  ou  $c$  independentemente. As rotinas do **Conjunto B** foram realizadas considerando  $c$  uma função de  $a$  (que define que o comprimento total do defeito é 4 vezes maior que a altura total do mesmo) porque se admitiu que os defeitos aumentam de tamanho nesta proporção. Foi com estes resultados que se obtiveram as previsões de tempo de vida do componente.

Existem no total 12 rotinas, 2 conjuntos de 6 rotinas. O **Conjunto A** utilizou no *input* os parâmetros  $\theta$ ,  $a$  e  $c$  independentes, e o **Conjunto B** utiliza-os dependentes do modo referido anteriormente. Em cada conjunto destes existem 6 rotinas, 2 delas referem aos defeitos embebido e superficial da tampa, as outras 4 referem aos pontos mais e menos profundos dos defeitos embebido e superficial no cordão de soldadura da zona central do corpo.

Os *outputs* das rotinas são os valores de  $\Delta K$  para os parâmetros admitidos. No **Conjunto A**, em que se variam  $\theta$ ,  $a$  e  $c$ , obtiveram-se matrizes de 3 dimensões,  $m \times n \times k$ , sendo que  $m$ ,  $n$  e  $k$  representam a dimensão dos vetores de  $\theta$ ,  $a$  e  $c$  utilizados. No **Conjunto B** obtiveram-se matrizes de 2 dimensões,  $m \times n$ , visto que o parâmetro  $c$  não é um parâmetro independente.

Para cada rotina as matrizes de valores foram escritas em ficheiros do tipo .csv, que significa, “Comma-Separated Values”. Desta forma, foram criados 2 ficheiros do tipo .csv para o resultado de cada rotina. Para as rotinas do **Conjunto A**, os *outputs* são um ficheiro com  $k$  matrizes de  $m \times n$  dimensões (que permitiu uma rápida visualização e interpretação dos valores) e outro ficheiro com um vetor de dimensão  $l = m \times n \times k$  (que permitiu um tratamento de dados preciso e automatizado para todos os valores), em que cada linha representa uma gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , para uma combinação única de valores  $\theta$ ,  $a$  e  $c$ , como se pode ver nas Figuras 4.3 e 4.4 a título de exemplo. Para as rotinas do **Conjunto B** um dos ficheiros contém uma matriz de dimensões de  $m \times n$  e o outro um vetor de dimensão  $l = m \times n$ , semelhantemente aos *outputs* do **Conjunto A**. Estes ficheiros são compatíveis com o *software* Microsoft Excel, onde se procedeu ao tratamento de dados do mesmo. Devido à quantidade de dados obtidas, apresentam-se no subcapítulo “4.3. Análise e Discussão de Resultados” os resultados tratados na forma de gráficos.

at/c	20																																								
1/c	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5																	
0.1	8.798	8.536	8.438	8.411	8.406	8.411	8.419	8.425	8.434	8.434	8.436	8.439	8.441	8.442	8.444	8.445	8.446	8.447	8.447	8.448	8.449	8.449	8.449	8.45																	
0.2	11.985	12.519	12.181	12.05	11.976	11.91	11.9	11.903	11.909	11.916	11.92	11.927	11.932	11.936	11.939	11.942	11.945	11.947	11.947	11.948	11.951	11.953	11.955	11.956	11.957																
0.3	13.799	15.078	15.144	15.002	14.849	14.688	14.625	14.602	14.614	14.62	14.627	14.632	14.637	14.642	14.646	14.649	14.652	14.654	14.656	14.657	14.658	14.659	14.66	14.661																	
0.4	14.877	16.954	17.5	17.502	17.385	17.124	16.994	16.937	16.916	16.911	16.912	16.917	16.924	16.931	16.938	16.945	16.952	16.958	16.964	16.97	16.975	16.979	16.984	16.988																	
0.5		18.405	19.345	19.608	19.591	19.336	19.15	19.002	18.981	18.974	18.981	18.988	18.996	19.005	19.014	19.022	19.03	19.038	19.045	19.052	19.058	19.064	19.068	19.07																	
0.75		20.716	23.545	23.455	23.927	24.1	23.927	23.621	23.647	23.578	23.54	23.522	23.517	23.52	23.528	23.539	23.552	23.566	23.58	23.595	23.609	23.623	23.636	23.649																	
1			24.629	26.072	26.918	27.903	28.007	27.906	27.785	27.691	27.627	27.589	27.571	27.567	27.573	27.586	27.603	27.623	27.645	27.665	27.689	27.692	27.716	27.74	27.763																
1.25				27.96	29.19	30.888	31.663	31.753	31.54	31.474	31.416	31.354	31.354	31.349	31.356	31.373	31.396	31.425	31.458	31.493	31.529	31.566	31.603	31.641	31.681																
1.5				29.326	30.937	33.203	34.358	34.942	34.972	34.646	34.345	34.063	33.949	33.942	33.955	34.001	34.075	34.078	34.126	34.176	34.229	34.289	34.359	34.439	34.519																
1.75					32.278	35.785	37.673	38.006	38.194	38.288	38.304	38.322	38.346	38.374	38.402	38.436	38.473	38.517	38.577	38.647	38.724	38.809	38.904	39.008	39.113																
2						33.324	36.754	38.734	40.027	40.739	41.143	41.386	41.544	41.661	41.758	41.848	41.937	42.028	42.121	42.217	42.316	42.417	42.52	42.623	42.728																
2.25						38.113	40.432	42.106	43.166	43.827	44.299	44.558	44.661	44.662	45.119	45.264	45.403	45.545	45.675	45.811	45.947	46.083	46.22	46.357																	
2.5						39.259	41.927	43.877	45.307	46.255	46.598	47.379	47.738	48.028	48.274	48.494	48.697	48.899	49.077	49.259	49.44	49.618	49.795	49.97																	
2.75						40.231	43.241	45.399	47.184	48.438	49.338	50.007	50.527	50.948	51.305	51.617	51.901	52.165	52.416	52.657	52.891	53.124	53.344	53.566																	
3							41.062	44.399	46.785	48.822	50.393	51.555	52.443	53.144	53.717	54.202	54.626	55.006	55.355	55.683	55.993	56.291	56.58	56.861	57.136																
3.25							45.432	48.054	50.199	52.133	53.569	55.133	56.36	57.32	58.13	58.86	59.58	60.26	60.92	61.57	62.24	62.91	63.58	64.26	64.94																
3.5								46.33	49.177	51.471	53.677	55.59	56.751	57.898	58.783	59.573	60.326	61.078	61.84	62.63	63.42	64.22	65.03	65.81	66.57																
3.75									47.139	50.209	52.683	54.928	57.031	58.338	59.962	61.718	62.037	62.877	63.628	64.309	64.936	65.521	66.102	66.596	67.097	67.58															
4									47.863	51.148	53.786	56.133	58.506	60.358	61.962	63.274	64.349	65.349	66.243	67.055	67.801	68.496	69.149	69.767	70.357	70.924															
4.25										52.096	54.806	57.263	59.638	61.922	63.685	65.195	66.511	67.675	68.718	69.667	70.54	71.351	72.112	72.832	73.518	74.175															
4.5											52.901	55.752	58.324	60.762	63.043	65.281	67.327	69.054	71.051	72.14	73.144	74.072	74.951	75.788	76.564	77.316															
4.75												53.617	56.32	59.32	61.83	64.355	66.621	68.72	70.394	71.889	73.238	74.474	75.607	76.664	77.656	78.592	79.482	80.333													
5													54.488	57.48	60.257	62.844	65.4	68.197	70.28	72.166	73.881	75.465	77.024	78.466	80.216	81.826	83.26	84.63													
5.25														55.241	58.138	61.807	65.403	69.021	71.721	73.323	74.895	76.433	77.903	79.328	81.084	82.883	84.585	86.198													

Figura 4.3 - Exemplo de representação da matriz tridimensional em forma de  $k$  matrizes de dimensão  $m \times n$ .

teta	c	a	deltaK
15	0.2	0.1	8.579
15	0.2	0.2	12.12
15	0.2	0.3	14.058
15	0.2	0.4	15.199
15	0.2	0.5	
15	0.2	0.75	
15	0.2	1	
15	0.2	1.25	
15	0.2	1.5	
15	0.2	1.75	
15	0.2	2	
15	0.2	2.25	
15	0.2	2.5	
15	0.2	2.75	
15	0.2	3	
15	0.2	3.25	
15	0.2	3.5	
15	0.2	3.75	
15	0.2	4	
15	0.2	4.25	
15	0.2	4.5	
15	0.2	4.75	
15	0.2	5	
15	0.2	5.25	
15	0.4	0.1	7.954
15	0.4	0.2	12.136
15	0.4	0.3	15.11

Figura 4.4 - Exemplo de representação da matriz tridimensional em forma de vetor com dimensão  $l = m \times n \times k$ .

## 4.2. Parâmetros

Os parâmetros de *input* necessários diferiram em cada rotina. As diferentes rotinas distinguem o tipo de defeito considerado, a sua localização, e para as rotinas que caracterizaram a zona central do corpo junto à soldadura, distinguiu-se ainda o ponto para o qual se obteve o resultado, o ponto menos profundo, junto do cordão de soldadura, ou o ponto mais profundo, mais afastado do mesmo (Figura 4.5).

Os defeitos embebidos foram considerados elípticos e os superficiais foram considerados semielípticos como se pode observar na Figura 4.5. O comprimento total do defeito embebido foi definido por  $2c$ , altura total do mesmo foi definida por  $2a$  e a profundidade a que o defeito se encontrava foi definido por  $p$ . No caso do defeito superficial o comprimento foi também definido por  $2c$ , mas a altura foi definida por  $a$ , e neste tipo de defeito o parâmetro  $p$  não é definido. Na Figura 4.5 encontram-se ainda as dimensões  $W$  e  $B$ , que definiram o comprimento da chapa no qual o defeito se alinha e a espessura da mesma, respetivamente. O parâmetro  $\theta$  indica a direção de propagação, em radianos, para o qual se obteve a gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , tendo como referência o centro do defeito elíptico ou semielíptico, caso se tratasse de um defeito embebido ou superficial, respetivamente. Encontram-se ainda assinaladas na Figura 4.5 as 4 zonas diferentes estudadas presentes no defeito do corpo, designadas por **A**, **B**, **C** e **D** que representam, respetivamente os pontos mais e menos profundos dos defeitos embebido e superficial.

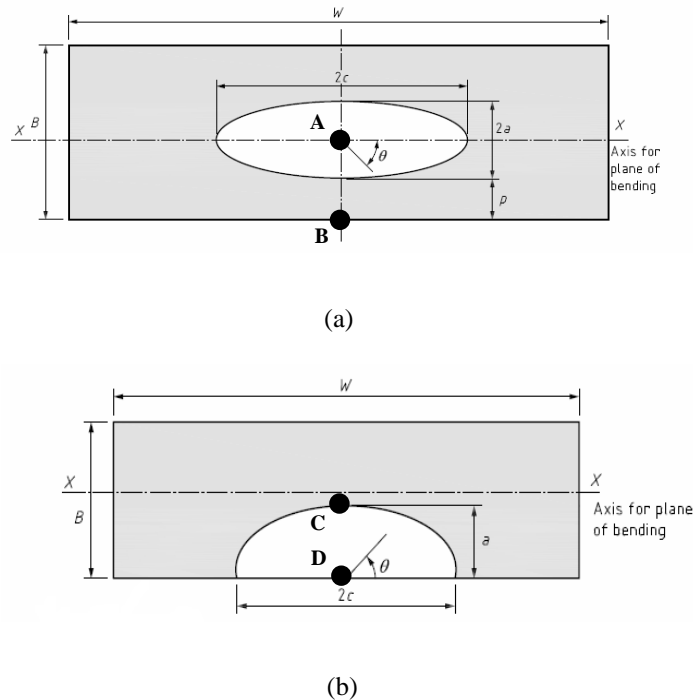


Figura 4.5 - Em (a) encontra-se uma representação de um defeito elíptico embebido na chapa e em (b) encontra-se uma representação de um defeito semielíptico superficial na chapa (adaptado de [2]).

As funções apresentadas de seguida correspondem às rotinas do **Conjunto A**. O nome da rotina encontra-se primeiro, e entre parêntesis, à frente, encontram-se as variáveis definidas dentro da rotina, que assumem os valores dos parâmetros de *input*, necessárias para a mesma funcionar:

- `deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_SurfacePoint_ind_teta_c_a(a,c,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_m,deltaS_b);`
- `deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_DeepPoint_ind_teta_c_a(a,c,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_m,deltaS_b);`
- `deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_SurfacePoint_ind_teta_c_a(a,c,p,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_m,deltaS_b);`
- `deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_DeepPoint_ind_teta_c_a(a,c,p,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_m,deltaS_b);`
- `deltaK_DefTampa_DefSuperficial_ind_teta_c_a(a,c,B,W,teta,deltaS_m,deltaS_b);`
- `deltaK_DefTampa_DefEmbebido_ind_teta_c_a(a,c,p,B,W,teta,deltaS_m,deltaS_b);`

Os parâmetros ***a***, ***c***, ***p***, ***B*** e ***W*** que se encontram entre parêntesis nas funções são exatamente os mesmos parâmetros que os indicados na Figura 4.5. O parâmetro ***teta*** das funções corresponde a  $\theta$  representado na Figura 4.5.

Na Figura 4.6 está representada a geometria das chapas soldadas e os cordões de soldadura na zona central do corpo da caixa. O parâmetro ***L***, representa a largura máxima entre os cordões de soldadura, isto é, da extremidade do cordão de soldadura de um lado da chapa transversal até à extremidade do cordão de soldadura do outro lado da chapa transversal.

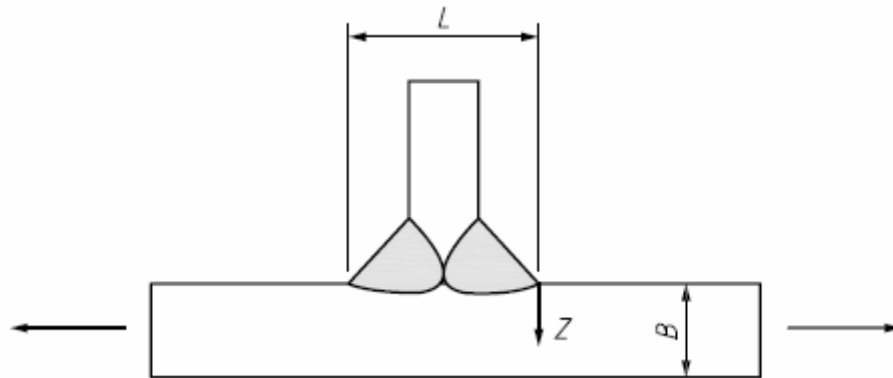


Figura 4.6 - Representação da geometria do cordão de soldadura presente na zona central do corpo da caixa [2].

Os parâmetros ***deltaS\_m*** e ***deltaS\_b*** indicados nas funções correspondem a  $\Delta\sigma_{membrana}$  e  $\Delta\sigma_{flexão}$  e assumiram os valores dos intervalos de tensão de membrana e de flexão,

respetivamente, a que a zona do defeito estava exposta. Estes foram diferentes para a zona da tampa e para a zona central do corpo.

Para a zona do defeito do corpo existem ainda os parâmetros  $k_{t_{membrana}}$  e  $k_{t_{flexão}}$ , representados nas funções por  $k_{tm}$  e  $k_{tb}$ , respetivamente. Estes representam os fatores de concentração de tensões, para as tensões de membrana e de flexão respetivamente, devido à proximidade a um cordão de soldadura.

Os valores atribuídos a cada uma das variáveis apresentadas anteriormente são os apresentados a seguir:

- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefSuperficial\_SurfacePoint\_ind\_teta\_c\_a}(a_{sup\_corpo\_ind}, c_{corpo\_ind}, 8, 491, \text{teta\_ind}, 18, 1.1613, 16.25, 33.12, 0.052);$
- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefSuperficial\_DeepestPoint\_ind\_teta\_c\_a}(a_{sup\_corpo\_ind}, c_{corpo\_ind}, 8, 491, \text{teta\_ind}, 18, 1.1613, 16.25, 33.12, 0.052);$
- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefEmbebido\_SurfacePoint\_ind\_teta\_c\_a}(a_{emb\_corpo\_ind}, c_{corpo\_ind}, 2, 8, 491, \text{teta\_ind}, 18, 1.1613, 16.25, 33.12, 0.052);$
- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefEmbebido\_DeepestPoint\_ind\_teta\_c\_a}(a_{emb\_corpo\_ind}, c_{corpo\_ind}, 2, 8, 491, \text{teta\_ind}, 18, 1.1613, 16.25, 33.12, 0.052);$
- $\text{deltaK\_DefTampa\_DefSuperficial\_ind\_teta\_c\_a}(a_{sup\_tampa\_ind}, c_{tampa\_ind}, 7, 834, \text{teta\_ind}, 21.26, 0.62);$
- $\text{deltaK\_DefTampa\_DefEmbebido\_ind\_teta\_c\_a}(a_{emb\_tampa\_ind}, c_{tampa\_ind}, 2, 7, 834, \text{teta\_ind}, 21.26, 0.62).$

Os parâmetros  $\theta$ ,  $a$  e  $c$  são os únicos que assumiram vários valores em cada rotina. Estes parâmetros foram definidos em forma de vetor em vez de valor (para possibilitar o *input* de múltiplos valores para cada parâmetro) de modo a ser possível obter as matrizes de 3 dimensões como *output*. Os *outputs* foram então os valores de  $\Delta K$  para cada combinação destes valores  $\theta$ ,  $a$  e  $c$  possível.

Cada rotina admitiu um dos vetores de  $a$ , um dos vetores de  $c$  e o vetor de  $\theta$ , tal como indicado nas funções apresentadas anteriormente.

Os vetores que  $a$  assumiu nas rotinas mencionadas são os seguintes:

- $a_{sup\_corpo\_ind}=[0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75; 2; 2.25; 2.5; 2.75; 3; 3.25; 3.5; 3.75; 4; 4.25; 4.5; 4.75; 5; 5.25; 5.5; 5.75; 6] \text{ [mm]};$
- $a_{emb\_corpo\_ind}=[0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.375; 0.5; 0.625; 0.75; 0.875; 1; 1.125; 1.25; 1.375; 1.5; 1.625; 1.75; 1.875; 2; 2.125; 2.25; 2.375; 2.5; 2.625; 2.75; 2.875; 3] \text{ [mm]};$



- $a_{sup\_tampa\_ind}=[0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75; 2; 2.25; 2.5; 2.75; 3; 3.25; 3.5; 3.75; 4; 4.25; 4.5; 4.75; 5; 5.25]$  [mm];
- $a_{emb\_tampa\_ind}=[0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.375; 0.5; 0.625; 0.75; 0.875; 1; 1.125; 1.25; 1.375; 1.5; 1.625; 1.75; 1.875; 2; 2.125; 2.25; 2.375; 2.5; 2.625]$  [mm].

Os vetores que  $c$  assumiu nas rotinas mencionadas são os seguintes:

- $c_{corpo\_ind}=[0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5; 5; 5.5; 6; 6.5; 7; 7.5; 8; 8.5; 9; 9.5; 10; 10.5; 11; 11.5; 12]$  [mm];
- $c_{tampa\_ind}=[0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5; 5; 5.5; 6; 6.5; 7; 7.5; 8; 8.5; 9; 9.5; 10; 10.5]$  [mm].

O parâmetro  $\theta$  assumiu apenas um vetor para as rotinas mencionadas e é o seguinte:

- $teta\_ind=[\pi/12; \pi/9; 5\pi/36; \pi/6; 7\pi/36; 2\pi/9; \pi/4; 5\pi/18; 11\pi/36; \pi/3; 13\pi/36; 7\pi/18; 5\pi/12; 4\pi/9; 17\pi/36; \pi/2]$  [rad].

O equivalente em graus do vetor **teta\_ind**, representativo do parâmetro  $\theta$ , seria:

- $teta\_ind=[15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90]$ .

O valor máximo que os vetores do parâmetro  $a$  atingiram corresponde a 75% do valor da espessura da chapa do componente. Para as rotinas que consideram um defeito na zona central do corpo, a espessura é de 8 mm, e para as rotinas que consideram um defeito na tampa, a espessura é de 7 mm, por isso, para cada rotina, o vetor de  $a$  que se usou teve um valor máximo diferente. Para uma mesma zona em análise, o valor de  $a$  foi diferente considerando defeitos superficiais e embebidos porque  $a$  caracterizou a altura total de um defeito superficial, e  $2a$  caracterizou a altura total de um defeito embebido (Figura 4.5). Por isso o  $a$  máximo para o defeito superficial no corpo foi 6 mm e para o defeito embebido do mesmo foi 3 mm, e o  $a$  máximo para o defeito superficial na tampa foi 5.25 mm e para o defeito embebido da mesma foi 2.625 mm. Arbitrou-se que o valor máximo devia ser 75% da espessura da chapa porque se admitiu que este valor seria o tamanho crítico e que quando a fenda o atingisse ocorreria a rotura do material.

Os valores de  $a$  maiores que 0.5 mm variaram em 0.25 mm, e variaram em 0.1 mm para valores menores que 0.5 mm, quando se considerou um defeito superficial. Por outro lado, quando se considerou um defeito embebido os valores de  $a$  variaram em 0.125 mm para valores maiores que 0.25 mm e variaram em 0.05 mm para valores menores que 0.25 mm. Os valores de  $c$  maiores que 1 mm variaram em 0.5 mm e os valores menores que 1 mm variaram 0.2 mm. Os parâmetros de  $a$  e  $c$  têm variações menores para valores mais pequenos para se obter um maior rigor nos resultados.

As rotinas realizaram todos os cálculos para um valor de  $\theta$ , um valor de  $a$  e um valor de  $c$ . Depois estes parâmetros assumem o valor seguinte dos vetores que os definem e a rotina realiza novamente os cálculos. Depois de os cálculos terem sido efetuados para todas as combinações possíveis, a rotina termina.

As rotinas que tiveram em consideração defeitos embebidos assumiram um valor de  $p$  igual a 2 mm. As que determinaram o resultado para a zona no topo da tampa da caixa admitiram um valor de  $B$  igual a 7 mm e um valor de  $W$  igual a 834 mm, e os que realizaram os cálculos para a zona central do corpo da caixa admitiram um valor de  $B$  igual a 8 mm e um valor de  $W$  igual a 491 mm. Estes valores correspondem aos comprimentos medidos no modelo original no *software* Solidworks.

A zona central do corpo da caixa é soldada e tem geometria como a apresentada na Figura 4.6. O parâmetro  $L$  dessa zona foi definido igual a 18 mm porque a chapa soldada tem espessura,  $B$ , igual a 8 mm, e foi arbitrado que os cordões de soldadura têm largura igual a 5 mm.

Os fatores de concentração de tensões,  $k_{tmembrana}$  e  $k_{tflexão}$  assumiram os valores calculados no subcapítulo “3.4 Análise de Resultados”, que são 1.1613 e 16.25, respetivamente.

Para obter os valores de  $\Delta\sigma_{membrana}$  e  $\Delta\sigma_{flexão}$ , admitiu-se que a amplitude da carga aplicada era igual a duas vezes a determinada no subcapítulo “3.4 Análise de Resultados”, tanto para o caso do defeito na zona central do corpo como para o caso do defeito na tampa. As tensões  $\Delta\sigma_{membrana}$  e  $\Delta\sigma_{flexão}$ , assumiram então os valores, 33.12 MPa e 0.052 MPa, respetivamente, para o caso do defeito no corpo, e 21.26 MPa e 0.62 MPa, respetivamente, para o caso do defeito na tampa.

Seguidamente apresentam-se as funções correspondentes às rotinas do **Conjunto B**. O nome da rotina encontra-se primeiro e de seguida, entre parêntesis, encontram-se as variáveis definidas dentro da rotina que assumem os valores dos parâmetros de *input*:

- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefSuperficial\_SurfacePoint\_dep\_teta\_c\_a}(a,B,W,teta,L,k_{tm},k_{tb},\text{deltaS\_m},\text{deltaS\_b});$
- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefSuperficial\_DeepestPoint\_dep\_teta\_c\_a}(a,B,W,teta,L,k_{tm},k_{tb},\text{deltaS\_m},\text{deltaS\_b});$
- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefEmbebido\_SurfacePoint\_dep\_teta\_c\_a}(a,p,B,W,teta,L,k_{tm},k_{tb},\text{deltaS\_m},\text{deltaS\_b});$
- $\text{deltaK\_DefCorpo\_DefEmbebido\_DeepestPoint\_dep\_teta\_c\_a}(a,p,B,W,teta,L,k_{tm},k_{tb},\text{deltaS\_m},\text{deltaS\_b});$
- $\text{deltaK\_DefTampa\_DefSuperficial\_dep\_teta\_c\_a}(a,B,W,teta,\text{deltaS\_m},\text{deltaS\_b});$

- $\text{deltaK\_DefTampa\_DefEmbebido\_dep\_teta\_c\_a}(a,p,B,W,\text{teta},\text{deltaS\_m},\text{deltaS\_b})$ .

Para este conjunto de rotinas apenas as variáveis  $\mathbf{a}$  e  $\boldsymbol{\theta}$  foram definidas em forma de vetor.

O parâmetro  $\mathbf{a}$  assumiu um dos seguintes vetores:

- $\mathbf{a\_sup\_corpo\_dep}=[0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75; 2; 2.25; 2.5; 2.75; 3; 3.25; 3.5; 3.75; 4; 4.25; 4.5; 4.75; 5; 5.25; 5.5; 5.75; 6]$  [mm];
- $\mathbf{a\_emb\_corpo\_dep}=[0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.375; 0.5; 0.625; 0.75; 0.875; 1; 1.125; 1.25; 1.375; 1.5; 1.625; 1.75; 1.875; 2; 2.125; 2.25; 2.375; 2.5; 2.625; 2.75; 2.875; 3]$  [mm];
- $\mathbf{a\_sup\_tampa\_dep}=[0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75; 2; 2.25; 2.5; 2.75; 3; 3.25; 3.5; 3.75; 4; 4.25; 4.5; 4.75; 5; 5.25]$  [mm];
- $\mathbf{a\_emb\_tampa\_dep}=[0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.375; 0.5; 0.625; 0.75; 0.875; 1; 1.125; 1.25; 1.375; 1.5; 1.625; 1.75; 1.875; 2; 2.125; 2.25; 2.375; 2.5; 2.625]$  [mm].

O parâmetro  $\boldsymbol{\theta}$  assumiu o vetor apresentado de seguida:

- $\mathbf{teta\_dep}=[\pi/12; \pi/9; 5*\pi/36; \pi/6; 7*\pi/36; 2*\pi/9; \pi/4; 5*\pi/18; 11*\pi/36; \pi/3; 13*\pi/36; 7*\pi/18; 5*\pi/12; 4*\pi/9; 17*\pi/36; \pi/2]$  [rad].

Tal como nas rotinas do **Conjunto A**, o vetor  $\mathbf{teta\_dep}$ , que representou o parâmetro  $\boldsymbol{\theta}$ , teria como vetor equivalente em graus:

- $\mathbf{teta\_dep}=[15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90]$ .

Os parâmetros  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{k}_{t_{membrana}}$ ,  $\mathbf{k}_{t_{flexão}}$ ,  $\Delta\sigma_{membrana}$  e  $\Delta\sigma_{flexão}$  assumiram os mesmos valores que nas funções do **Conjunto A**.

Tal como já foi referido anteriormente o parâmetro  $\mathbf{c}$  foi definido como função do parâmetro  $\mathbf{a}$  para as rotinas do **Conjunto B**. É por este motivo que o parâmetro  $\mathbf{c}$  não foi definido nos parâmetros de *input* deste conjunto.

### 4.3. Análise e Discussão de Resultados

Os *outputs* das rotinas, tanto do **Conjunto A** como do **Conjunto B**, consistiram em valores das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta\mathbf{K}$ . Como já foi referido anteriormente, os ficheiros de resultados apresentaram vários valores de  $\Delta\mathbf{K}$  consoante os parâmetros escolhidos e a rotina executada.

Para a obtenção dos gráficos descritivos da evolução de  $\Delta\mathbf{K}$  e dos gráficos indicadores do número de ciclos de vida previstos do componente,  $\mathbf{N}$ , utilizaram-se os ficheiros de *output* das

rotinas do **Conjunto B**. Também se utilizaram estes *outputs* para a obtenção da evolução de  $\Delta K$  com o tamanho da fenda. Nestes encontra-se esboçada a evolução de  $\Delta K$  em função da altura da fenda,  $a$ , sabendo que a relação comprimento/altura do defeito é constante para as rotinas do **Conjunto B**. Tem-se por isso, a representação de  $\Delta K$  em função do tamanho geral do defeito, nestes gráficos.

Para obtenção dos gráficos que analisam a evolução do  $\Delta K$  com a altura do defeito,  $a$ , e com o comprimento do mesmo,  $c$ , na relação  $a/c$ , utilizaram-se os ficheiros de *output* das rotinas do **Conjunto A** (ver anexo “B.1. Resultados das rotinas do Conjunto A”).

Com o objetivo de determinar o número de ciclos previstos de o componente suportar,  $N$ , desenvolveu-se uma equação baseada na Lei de Paris (Equação 4.1):

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \Rightarrow N_i = \frac{1}{C} \int_{a_{i-1}}^{a_i} \Delta K^{-m} da, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

A Equação 4.1 permitiu determinar o número de ciclos,  $N_i$ , que o componente faz para uma fenda em estudo passar de uma altura  $a_{i-1}$  para uma altura  $a_i$ , sendo  $a_{i-1}$  e  $a_i$  valores do vetor do parâmetro  $a$ . Quando  $i = 1$  tem-se  $a_0$  que corresponde ao primeiro valor do vetor definido para o parâmetro  $a$ .

Depois de determinado o número de ciclos entre os valores de  $a$ , procedeu-se ao somatório (Equação 4.2) para determinar o número de ciclos total do componente,  $N$ , para o respetivo caso considerado:

$$N = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \frac{1}{C} \int_{a_{i-1}}^{a_i} \Delta K^{-m} da, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.2)$$

Com a Equação 4.2 é então possível obter  $N$  partindo de um  $a_0$  até um  $a_{\max}$ , em que  $a_0$  é a altura inicial do defeito e  $a_{\max}$  é a altura crítica da fenda. A integral da Equação 4.2 foi calculada pela expressão da Equação 4.3:

$$\int_{a_{i-1}}^{a_i} \Delta K^{-m} da = \left( \frac{\Delta K_i^{-m} + \Delta K_{i-1}^{-m}}{2} \right) \times (a_i - a_{i-1}), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.3)$$

Os cálculos do número de ciclos esperados para o componente foram realizados para o **Conjunto B** das rotinas, em que o parâmetro  $c$  é função de  $a$ . Para o **Conjunto A** houve combinações dos parâmetros  $a$  e  $c$  que não respeitaram condições para aplicação das equações da norma BS 7910 [2], razão pela qual não se obtiveram resultados para essas combinações de

parâmetros. As equações da norma utilizadas são apenas aplicáveis quando a relação  $a/c$  é maior que 0.1 e menor que 1, o que significa que quando esta condição não é respeitada as equações não podem ser aplicadas e por isso os cálculos não são realizados e não se obtém valor de  $\Delta K$  para esse conjunto de parâmetros. Para os casos de um defeito presente no cordão de soldadura na zona central do corpo existe ainda uma condição adicional que impõe que a relação  $a/2c$  deve ser maior que 0.1 e menor que 1. Para o **Conjunto B** não ocorreu este problema porque para as rotinas que assumiram defeito embebido tem-se que o valor do parâmetro  $c$  é igual a 4 vezes o do parâmetro  $a$  e para as rotinas que assumiram defeito superficial tem-se que o valor do parâmetro  $c$  é igual a 2 vezes o do parâmetro  $a$ , o que respeitou sempre as condições de aplicação das equações da norma. Estas considerações foram diferentes entre as rotinas que consideram defeito embebido e as rotinas que consideram defeito superficial para, em ambos casos, o comprimento total do defeito ser igual a 4 vezes a altura total do mesmo.

Os cálculos para determinação do número de ciclos,  $N$ , dependeram de 2 constantes do material:  $C$  e  $m$ . Como não se conhece ao certo a microestrutura do aço que constitui o componente, admitiram-se dois grupos de valores para estas constantes:

- $C = 5.59 \times 10^{-9}$ ,  $m = 3.25$  – Valores típicos para uma microestrutura austenítica [5];
- $C = 6.87 \times 10^{-9}$ ,  $m = 3$  – Valores típicos para uma microestrutura ferrítico-perlítica [5].

Foi então calculado o número de ciclos que o componente realiza antes da falha com os grupos das constantes do material,  $C$  e  $m$ , para uma microestrutura austenítica e uma microestrutura ferrítico-perlítica. Deste modo obtiveram-se 2 conjuntos de dados e por conseguinte dois conjuntos de gráficos. Os gráficos de  $N$  encontram-se então identificados com os valores de  $C$  e  $m$  que assumiram.

Da Figura 4.7 à Figura 4.14 apresentam-se os gráficos descritivos da evolução da velocidade de propagação da fenda,  $da/dN$ , em função da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , e da altura de fenda,  $a$ , em função do número de ciclos efetuados pelo componente,  $N$ . Estes gráficos usam os resultados das rotinas do **Conjunto B**, como já foi referido, e por isso mantêm a relação entre o comprimento total e a altura total do defeito. Os gráficos apresentados no presente subcapítulo foram obtidos com os valores de  $N$  determinados usando as constantes do material correspondentes a uma microestrutura ferrítico-perlítica. Estes gráficos correspondem ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo, ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo, ao defeito embebido na tampa e ao defeito superficial na tampa.

No “Anexo B” encontram-se todos os gráficos realizados. Neste anexo estão os gráficos do **Conjunto A**, de  $\Delta K$  em função de  $a/c$  (para 5 diferentes direções de propagação,  $\theta$ ), relativos aos pontos mais e menos profundos, de um defeito embebido e de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo, e relativos a um defeito embebido e um defeito superficial na zona da tampa. Ainda neste anexo encontram-se os gráficos do **Conjunto B**, de  $N$  em função de  $\Delta K$ , de  $N$  em função de  $a$  (para uma microestrutura ferrítico-perlítica e para uma microestrutura austenítica) e de  $\Delta K$  em função de  $a$ .

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram os gráficos de  $da/dN$  em função de  $\Delta K$  e de  $N$  em função de  $a$ , consoante os diferentes valores de  $\theta$ , correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo, para uma microestrutura ferrítico-perlítica.

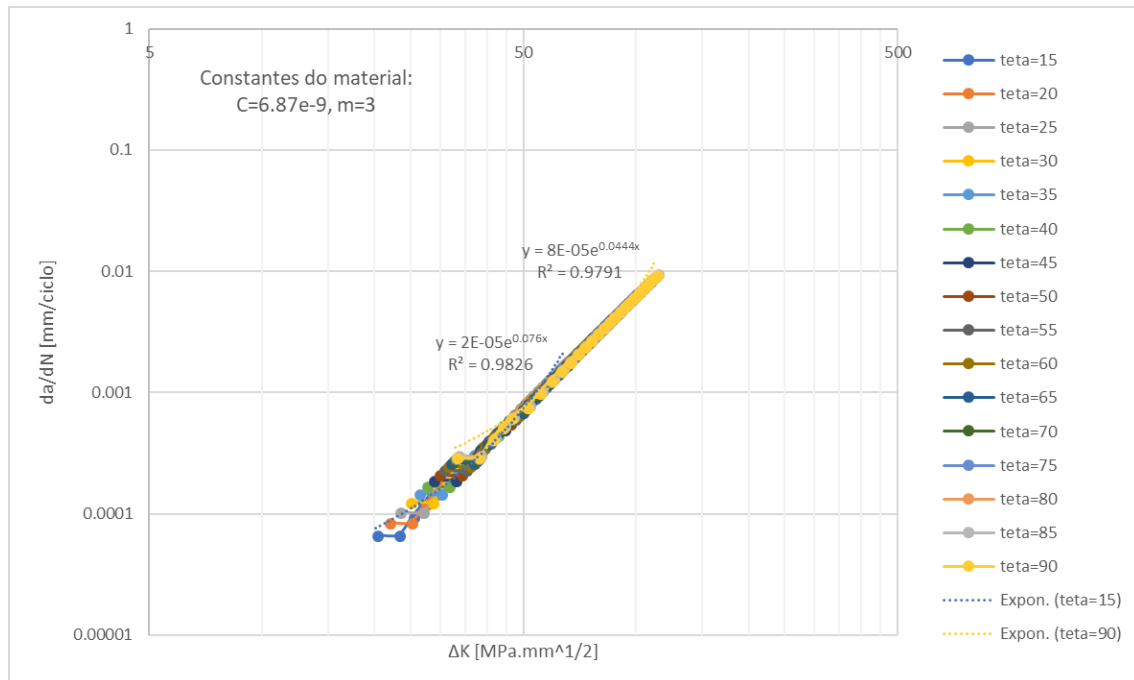


Figura 4.7 - Gráfico que relaciona  $da/dN$  com  $\Delta K$  para o ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo. C=6.87E-9, m=3.

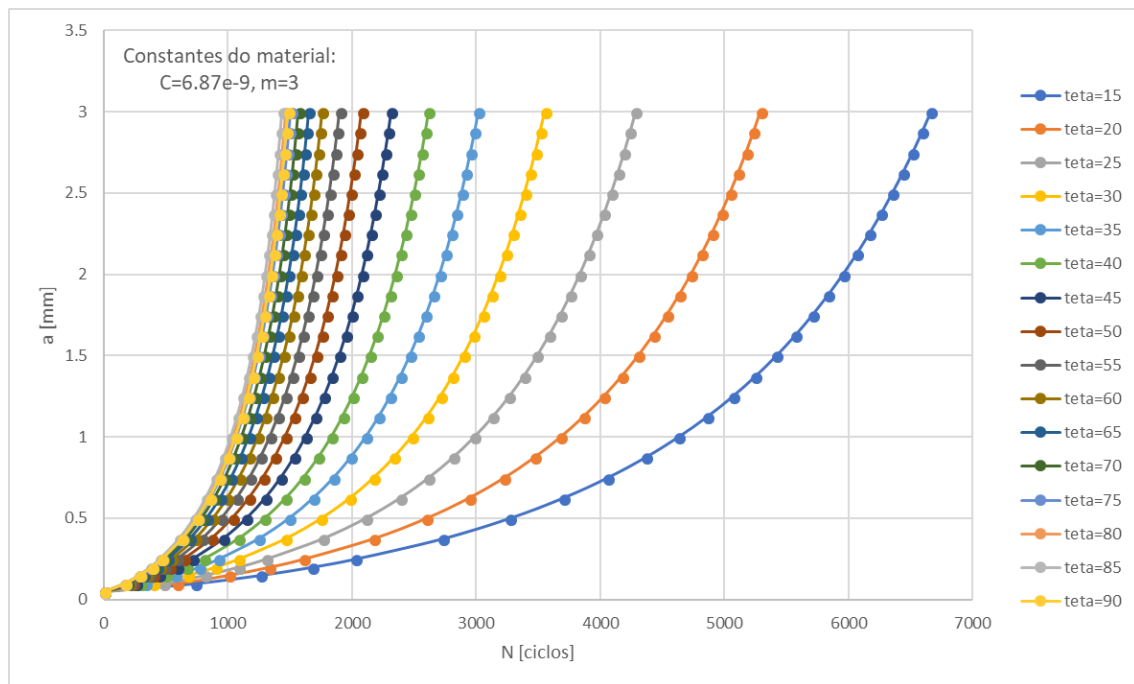


Figura 4.8 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $N$  para o ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.  $C=6.87E-9$ ,  $m=3$ .

Os resultados obtidos nas Figuras 4.7 e 4.8 mostram que  $da/dN$  evolui exponencialmente relativamente a  $\Delta K$ . Também se verifica que a evolução de  $da/dN$  é idêntica para qualquer  $\theta$  admitido (as curvas têm a mesma forma para os vários valores de  $\theta$ ), mas que  $da/dN$  e  $\Delta K$  assumem valores mais elevados se se admitir um  $\theta$  maior. Conclui-se então que o tempo de vida esperado do componente seria maior se a evolução da fenda se desse numa direção de propagação de menor ângulo, e um menor tempo de vida se se admitisse uma direção de propagação de maior ângulo. Para a direção de propagação com o menor ângulo considerado,  $\theta$  igual a  $15^\circ$ , o componente faria na fase de propagação de fenda aproximadamente 6662 ciclos, e para o maior ângulo,  $\theta$  igual a  $90^\circ$ , 1481 ciclos.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 encontram-se os gráficos relativos ao ponto menos profundo de um defeito superficial presente no cordão de soldadura da zona central do corpo, para uma microestrutura ferrítico-perlítica.

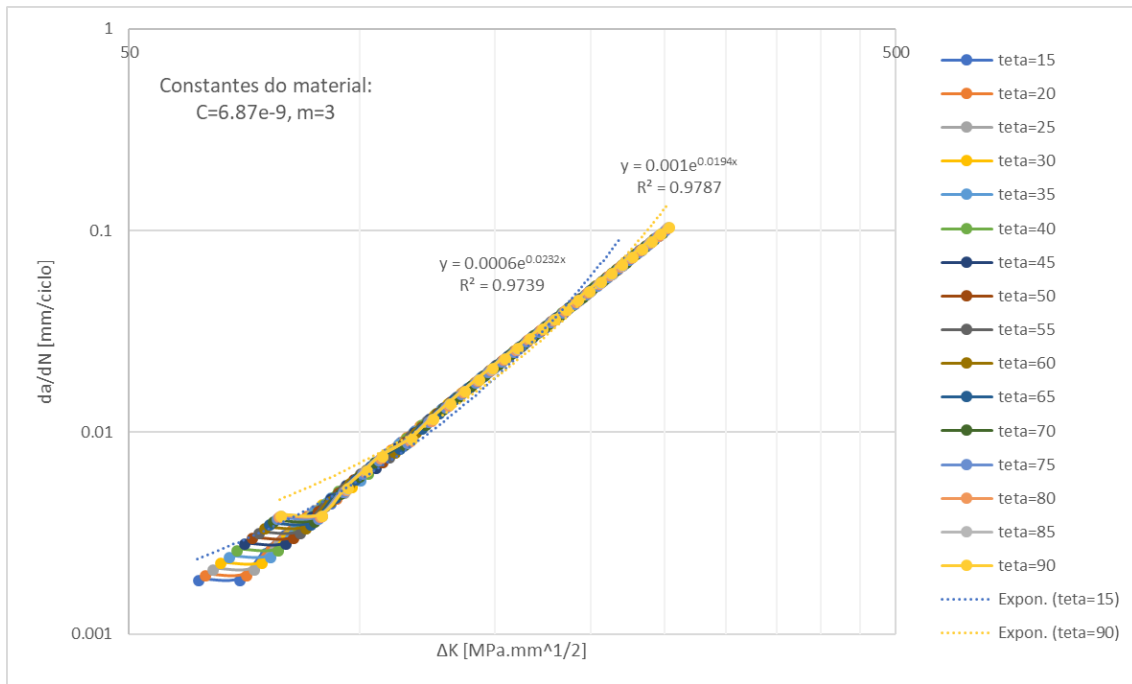


Figura 4.9 - Gráfico que relaciona  $da/dN$  com  $\Delta K$  para o ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo. C=6.87E-9, m=3.

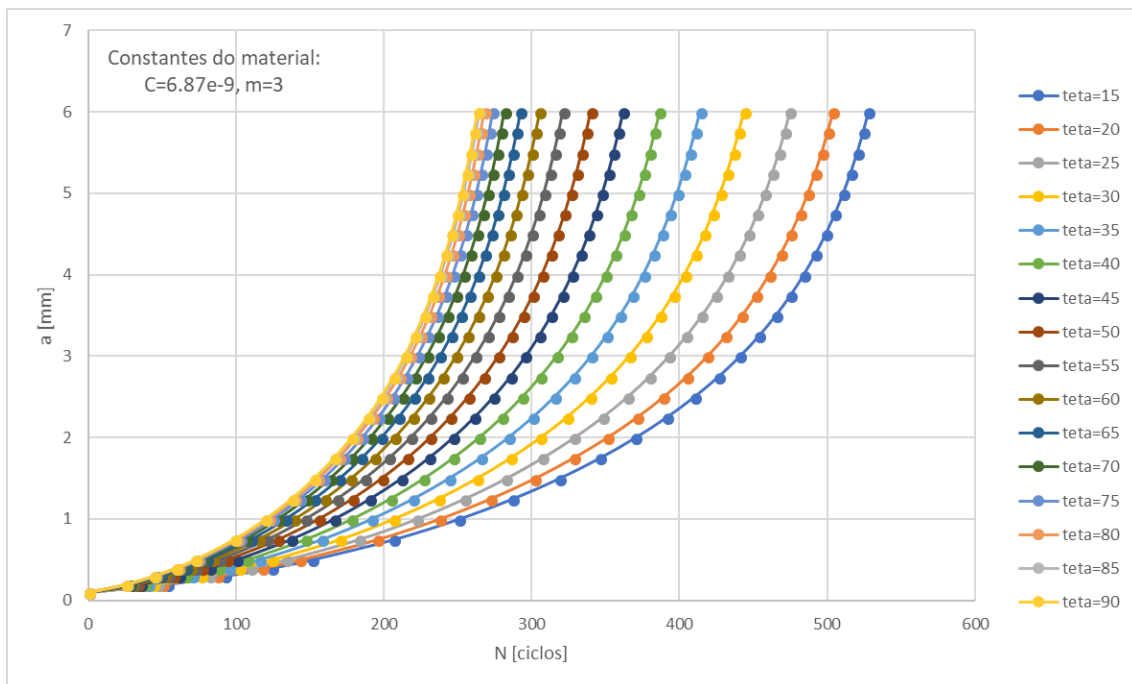


Figura 4.10 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $N$  para o ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo. C=6.87E-9, m=3.

Nas Figuras 4.11 a 4.14 encontram-se os gráficos relativos aos defeitos embebido e superficial na zona da tampa (zona sem soldadura):



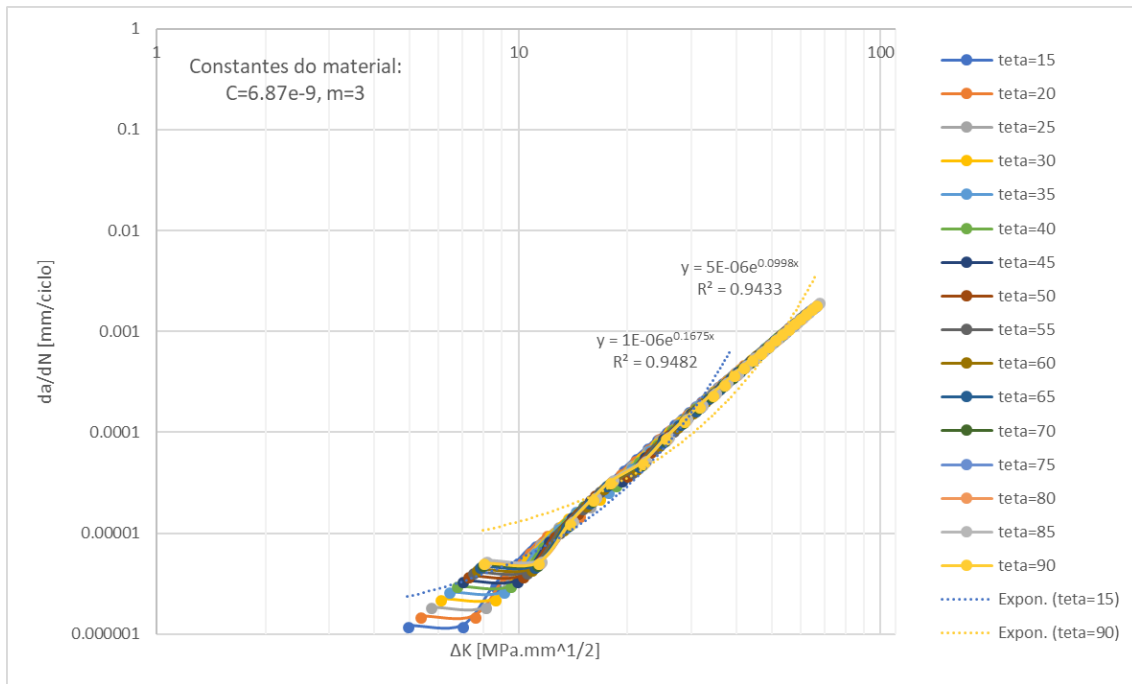


Figura 4.11 - Gráfico que relaciona  $da/dN$  com  $\Delta K$  para um defeito embebido na zona da tampa (zona sem soldadura).  $C=6.87E-9$ ,  $m=3$ .

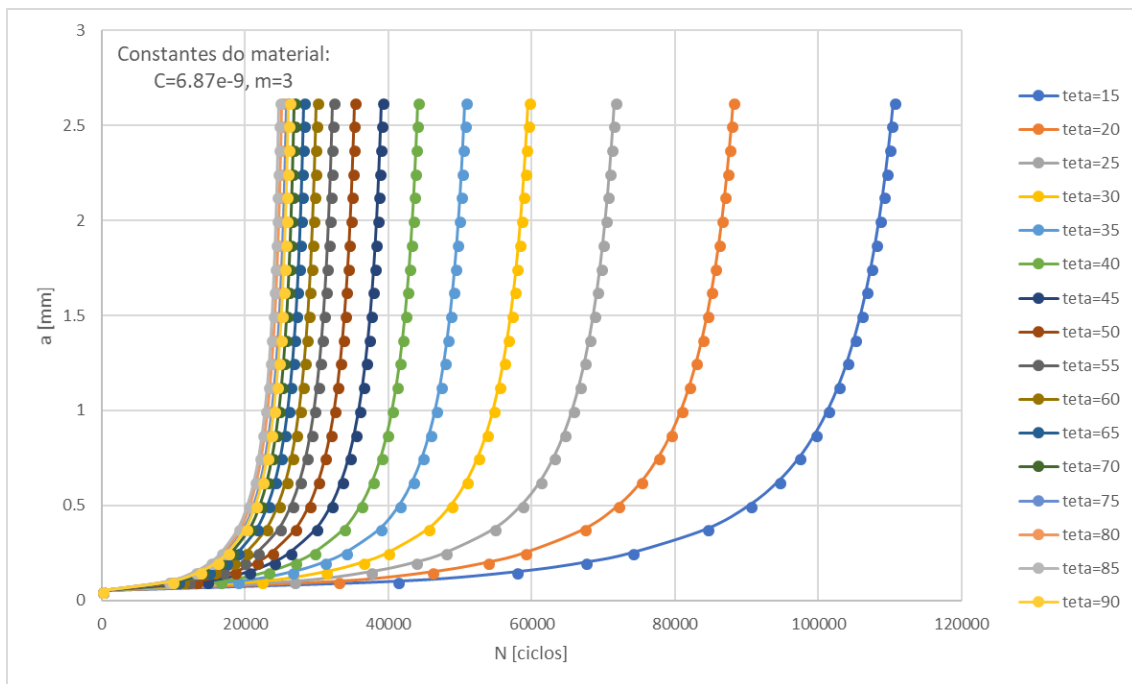


Figura 4.12 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $N$  para um defeito embebido na zona da tampa (zona sem soldadura).  $C=6.87E-9$ ,  $m=3$ .

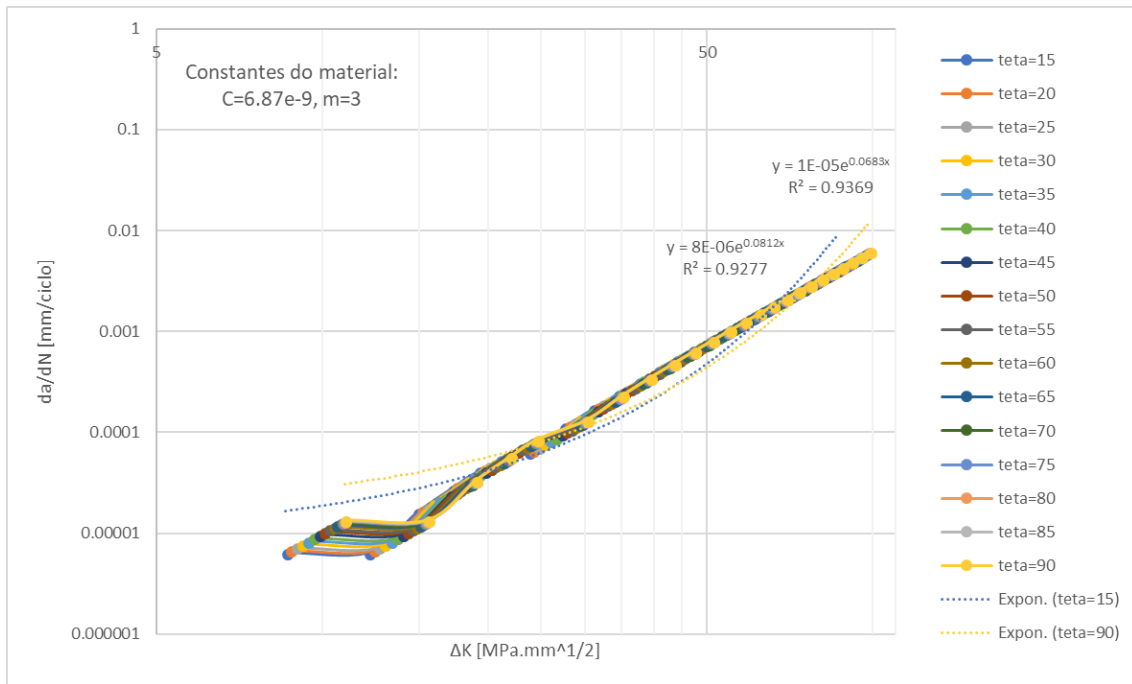


Figura 4.13 - Gráfico que relaciona  $da/dN$  com  $\Delta K$  para um defeito superficial na zona da tampa (zona sem soldadura). C=6.87E-9, m=3.

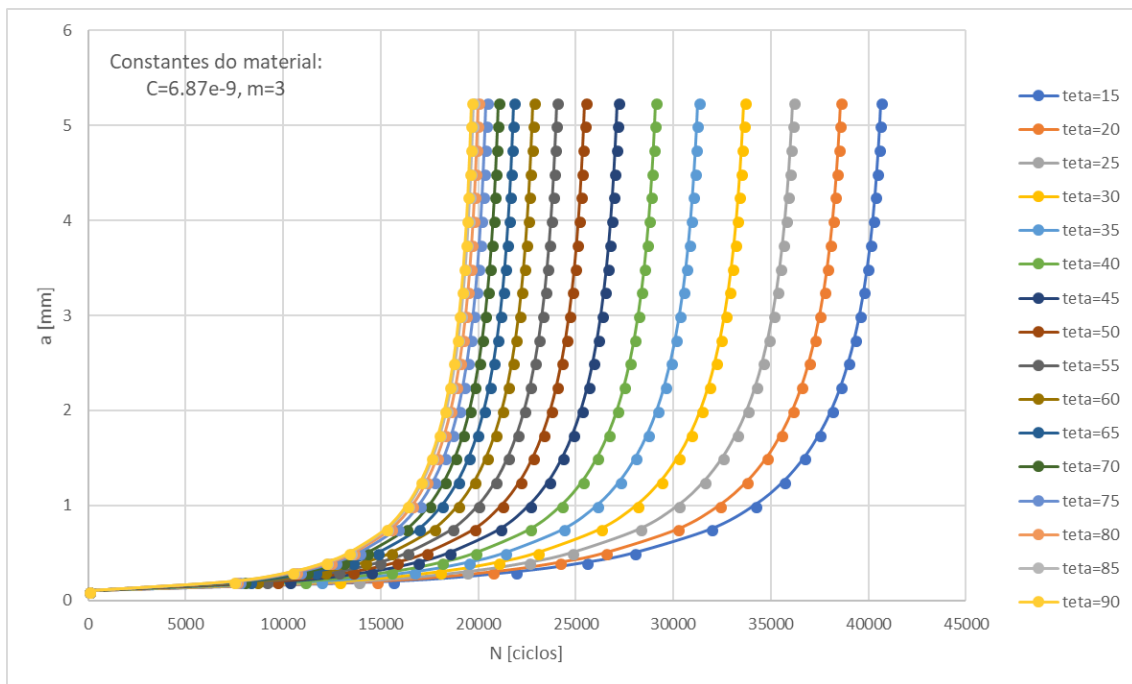


Figura 4.14 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $N$  para um defeito superficial na zona da tampa (zona sem soldadura). C=6.87E-9, m=3.

Na Tabela 4.1 encontram-se as equações das linhas de tendência dos gráficos da evolução da velocidade de propagação da fenda (para o menor e maior valor de  $\theta$ , 15° e 90°, respetivamente), assim como os valores dos coeficientes de determinação,  $R^2$ , para analisar a precisão das aproximações.

Observando os gráficos presentes nas Figuras 4.7, 4.9, 4.11 e 4.13 conclui-se que a evolução de  $da/dN$  evolui em todos os casos de um modo aproximadamente exponencial em função de  $\Delta K$ , tal como se pode verificar pelos valores de  $R^2$  (Tabela 4.1), que são aproximadamente 1.

Tabela 4.1 - Tabela comparativa das equações da evolução da velocidade de crescimento de fenda para os diferentes casos possíveis, para a zona central do corpo e para a zona da tampa, assumindo as direções de propagação,  $\theta$ , de  $15^\circ$  e  $90^\circ$ .

Equação, Valor de $R^2$	Direção de propagação da fenda: $\theta = 15^\circ$ .		Direção de propagação da fenda: $\theta = 90^\circ$ .	
	Microestrutura austenítica: $C = 5.59 \times 10^{-9}$ $m = 3.25$	Microestrutura ferrítico-perlítica: $C = 6.87 \times 10^{-9}$ $m = 3$	Microestrutura austenítica: $C = 5.59 \times 10^{-9}$ $m = 3.25$	Microestrutura ferrítico-perlítica: $C = 6.87 \times 10^{-9}$ $m = 3$
Ponto Mais Profundo - Defeito Embebido, Zona do Corpo (zona soldada)	$y = 3E-05e^{0.0823x}$ $R^2 = 0.9826$	$y = 2E-05e^{0.076x}$ $R^2 = 0.9826$	$y = 0.0001e^{0.0481x}$ $R^2 = 0.979$	$y = 8E-05e^{0.0444x}$ $R^2 = 0.9791$
Ponto Menos Profundo - Defeito Embebido, Zona do Corpo (zona soldada)	$y = 0.0003e^{0.0394x}$ $R^2 = 0.988$	$y = 0.0002e^{0.0364x}$ $R^2 = 0.988$	$y = 0.0017e^{0.0231x}$ $R^2 = 0.9855$	$y = 0.0008e^{0.0213x}$ $R^2 = 0.9855$
Ponto Mais Profundo - Defeito Superficial, Zona do Corpo (zona soldada)	$y = 0.0002e^{0.0429x}$ $R^2 = 0.9544$	$y = 1E-04e^{0.0396x}$ $R^2 = 0.9545$	$y = 0.0003e^{0.0358x}$ $R^2 = 0.9607$	$y = 0.0002e^{0.033x}$ $R^2 = 0.9607$
Ponto Menos Profundo - Defeito Superficial, Zona do Corpo (zona soldada)	$y = 0.0012e^{0.0252x}$ $R^2 = 0.9739$	$y = 0.0006e^{0.0232x}$ $R^2 = 0.9739$	$y = 0.0022e^{0.021x}$ $R^2 = 0.9786$	$y = 0.001e^{0.0194x}$ $R^2 = 0.9787$
Defeito Embebido, Zona da Tampa	$y = 1E-06e^{0.1817x}$ $R^2 = 0.9479$	$y = 1E-06e^{0.1675x}$ $R^2 = 0.9482$	$y = 7E-06e^{0.1082x}$ $R^2 = 0.943$	$y = 5E-06e^{0.0998x}$ $R^2 = 0.9433$
Defeito Superficial, Zona da Tampa	$y = 1E-05e^{0.088x}$ $R^2 = 0.9274$	$y = 8E-06e^{0.0812x}$ $R^2 = 0.9277$	$y = 2E-05e^{0.0741x}$ $R^2 = 0.9366$	$y = 1E-05e^{0.0683x}$ $R^2 = 0.9369$

Analisando as Figuras 4.7, 4.9, 4.11 e 4.13 e a Tabela 4.1, observa-se que os valores de  $da/dN$  são mais elevados quando considerando os pontos menos profundos do que quando considerando os pontos mais profundos, pois nessa zona os fatores de concentração de tensão são maiores devido ao cordão de soldadura (e, por conseguinte, as gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , também o são).

Na Tabela 4.2 apresenta-se uma comparação do número de ciclos previsto,  $N$ , para os pontos mais e menos profundos de um defeito embebido e superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo, assim como o número de ciclos previsto para um defeito embebido e superficial na tampa, considerando ambos os grupos de constantes do material.

Tabela 4.2 - Tabela comparativa do número de ciclos que o componente realiza para os diferentes casos possíveis, para a zona central do corpo e para a zona da tampa, assumindo as direções de propagação,  $\theta$ , de  $15^\circ$  e  $90^\circ$ .

Número de ciclos realizados, $N$	Direção de propagação da fenda: $\theta = 15^\circ$ .		Direção de propagação da fenda: $\theta = 90^\circ$ .	
	Microestrutura austenítica: $C = 5.59 \times 10^{-9}$ $m = 3.25$	Microestrutura ferrítico-perlítica: $C = 6.87 \times 10^{-9}$ $m = 3$	Microestrutura austenítica: $C = 5.59 \times 10^{-9}$ $m = 3.25$	Microestrutura ferrítico-perlítica: $C = 6.87 \times 10^{-9}$ $m = 3$
Ponto Mais Profundo - Defeito Embebido, Zona do Corpo (zona soldada)	3386 ciclos	6662 ciclos	667 ciclos	1481 ciclos
Ponto Menos Profundo - Defeito Embebido, Zona do Corpo (zona soldada)	252 ciclos	617 ciclos	49 ciclos	136 ciclos
Ponto Mais Profundo - Defeito Superficial, Zona do Corpo (zona soldada)	1692 ciclos	3619 ciclos	779 ciclos	1777 ciclos
Ponto Menos Profundo - Defeito Superficial, Zona do Corpo (zona soldada)	204 ciclos	527 ciclos	96 ciclos	263 ciclos
Defeito Embebido, Zona da Tampa	79008 ciclos	110554 ciclos	16544 ciclos	26066 ciclos
Defeito Superficial, Zona da Tampa	25416 ciclos	40631 ciclos	11521 ciclos	19639 ciclos

Observando os resultados apresentados na Tabela 4.2, concluiu-se que para o ponto mais profundo de um defeito embebido na zona central do corpo e uma direção de propagação de  $\theta$  igual a  $15^\circ$ , o componente efetuará 3386 ciclos até à fratura para uma microestrutura austenítica e 6662 ciclos para uma microestrutura ferrítico-perlítica. Isto mostra que o número de ciclos previstos que o componente efetua seria menor para uma microestrutura austenítica e maior para uma microestrutura ferrítico-perlítica (tal como verificado na análise da Tabela 4.1). Verifica-se o mesmo fenómeno quando se considera outro tipo de defeito ou outra zona onde este se encontra presente, assim como para a direção de propagação de  $\theta$  igual a  $90^\circ$ .

Considerando uma microestrutura austenítica e uma direção de propagação de  $\theta$  igual a  $15^\circ$ , o número de ciclos que o componente efetua para o ponto mais profundo de um defeito embebido na zona central do corpo, é 3386 ciclos, e para o ponto menos profundo, 252 ciclos. Constatou-se o mesmo para a outra microestrutura, para o defeito superficial na mesma zona e para a direção de propagação de  $\theta$  igual a  $90^\circ$ . Isto significa que o cordão de soldadura tem um efeito notável no número de ciclos que o componente suporta. A razão de assim ser é porque na superfície (zona menos profunda), junto do cordão de soldadura, existe maior concentração de tensões, o que implica uma maior gama dos fatores de intensidade de tensões, e por isso o número de ciclos de vida do componente é menor que o obtido para a zona mais profunda nas mesmas condições.

Quando considerando uma microestrutura austenítica,  $\theta$  igual a  $15^\circ$ , e o ponto mais profundo para um defeito embebido e um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo, o número de ciclos é 3386 e 1692, respetivamente. Isto repete-se para o ponto menos profundo, para a outra microestrutura e para  $\theta$  igual a  $90^\circ$ . Logo, verifica-se que o defeito superficial tem uma maior gama dos fatores de intensidade de tensões que o defeito embebido e, por isso, um menor número de ciclos de vida previsto para o componente.

Comparando ainda o número de ciclos de vida previsto para um defeito presente na tampa com um defeito presente no corpo, constatou-se que para a tampa, o valor de  $N$  previsto seria consideravelmente maior que para o corpo. Para uma microestrutura austenítica, um valor de  $\theta$  igual a  $15^\circ$ , e para um defeito embebido no corpo, preveem-se 3386 ciclos para o ponto mais profundo e 252 ciclos para o ponto menos profundo, e para um defeito embebido na tampa, preveem-se 79008 ciclos. No caso da outra microestrutura, da outra direção de propagação e do outro tipo de defeito verifica-se também uma grande diferença. Isto indica que a presença do cordão de soldadura foi crítica para o defeito presente no corpo, visto que o defeito na zona da tampa não tinha na proximidade nenhum cordão de soldadura.

Avaliando os gráficos apresentados nas Figuras 4.7 a 4.14 observa-se que, para qualquer um dos possíveis casos considerados, o número de ciclos previstos para uma direção de propagação de  $\theta$  igual a  $15^\circ$  é maior que para qualquer outra direção de propagação, e que à medida que se aumenta o ângulo da direção de propagação, o número de ciclos previsto até à rotura diminui.

Nas Figuras 4.15 a 4.18 encontram-se os gráficos que relacionam o tamanho de fenda com as gamas dos fatores de intensidade de tensões, para os casos apresentados anteriormente. Tal como os gráficos apresentados nas Figuras 4.7 a 4.14, estes foram obtidos com os resultados das rotinas do **Conjunto B**, o que significa que o tamanho de fenda foi definido nos gráficos pelo

parâmetro  $a$ , no entanto não é apenas  $a$  que varia, visto que o parâmetro  $c$  foi definido como função de  $a$ .

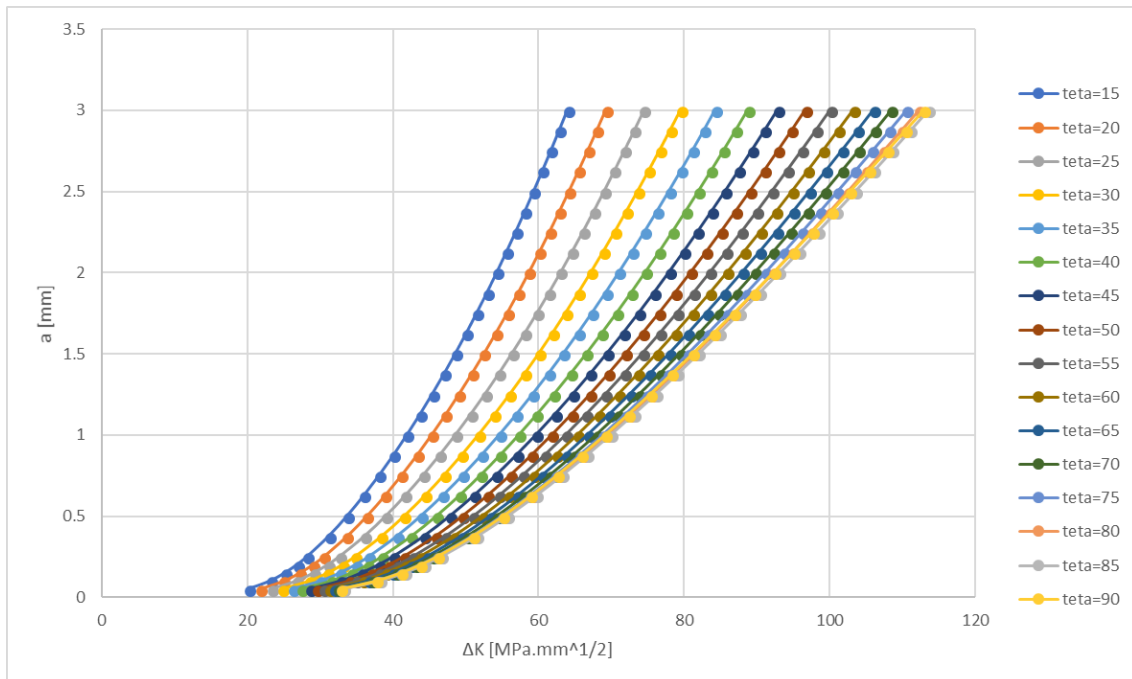


Figura 4.15 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $\Delta K$  para o ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.

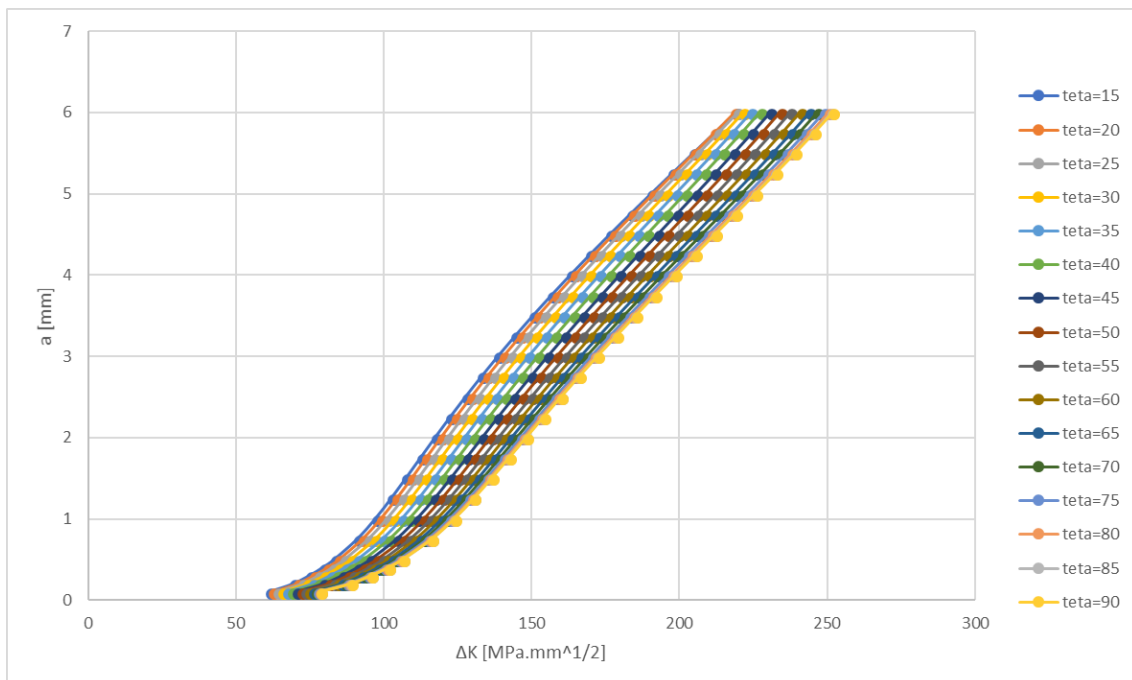


Figura 4.16 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $\Delta K$  para o ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.

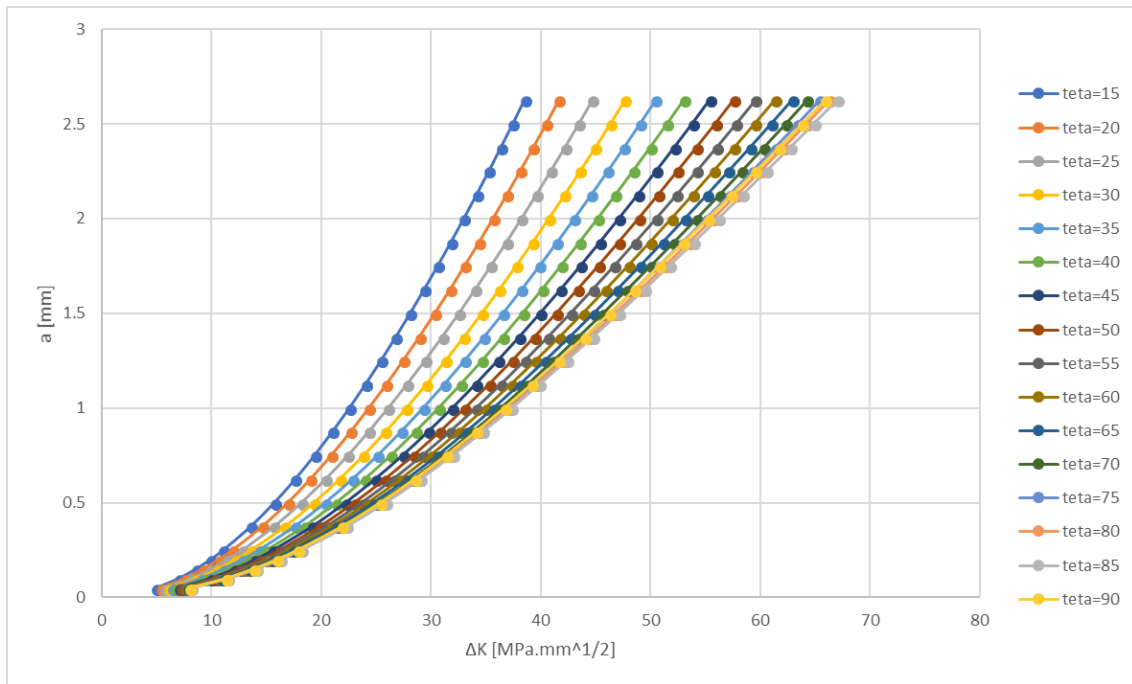


Figura 4.17 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $\Delta K$  para um defeito embecido na zona da tampa (zona sem soldadura).

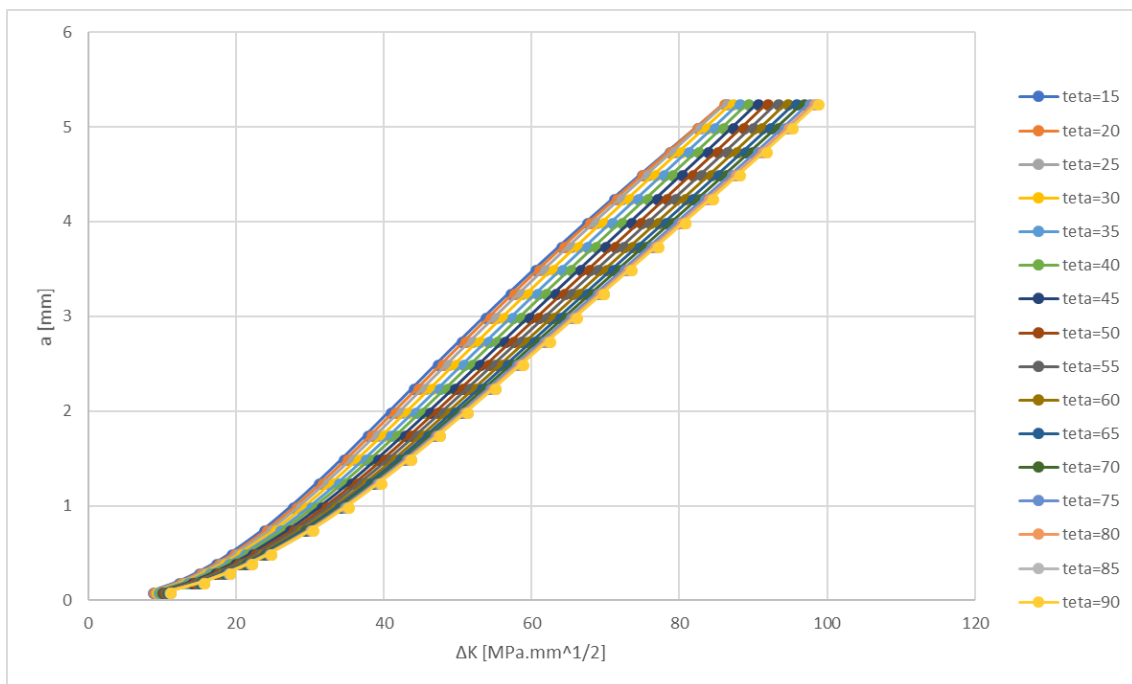


Figura 4.18 - Gráfico que relaciona  $a$  com  $\Delta K$  para um defeito superficial na zona da tampa (zona sem soldadura).

Analisando os gráficos das Figuras 4.15 a 4.18 observou-se que a gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , aumenta sempre com o aumento do tamanho da fenda, e aumenta também com o aumento do ângulo da direção de propagação,  $\theta$ .

Para os defeitos superficiais, e para valores de  $a$  compreendidos entre 0 e 1, aproximadamente, os valores de  $\Delta K$  crescem mais rapidamente em função de  $a$  do que para os valores de  $a$  maiores que 1. Isto indica que, para um defeito superficial de tamanho de fenda pequeno, o valor de  $\Delta K$  cresce mais rapidamente do que para uma fenda maior, que cresce de um modo aproximadamente linear em função do tamanho da fenda. No caso dos defeitos embebidos,  $\Delta K$  evolui de um modo logarítmico em função de  $a$ , e por isso,  $\Delta K$  cresce mais lentamente com o aumento de  $a$ .





## Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros

Uma nova metodologia foi apresentada neste trabalho, que envolve métodos numéricos e analíticos para determinação do número de ciclos de vida de um componente ferroviário sujeito a vibrações.

Avaliando os modos de vibração 3 e 5 concluiu-se que o componente fica sujeito a grandes deformações na zona do defeito da tampa pondo em causa a durabilidade do componente. Concluiu-se ainda que na zona do defeito do corpo não existem tensões elevadas mas a presença do cordão de soldadura introduz uma concentração de tensões muito grande, e por isso, essa zona é propícia a falha por fadiga.

No estudo do fator de concentração de tensões no cordão de soldadura concluiu-se que os valores obtidos são  $k_{t_{membrana}} = 1.16$  e  $k_{t_{flexão}} = 16.25$ .

Concluiu-se do estudo da velocidade de propagação de fenda, que  $da/dN$  evolui exponencialmente em relação às gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ . Também se concluiu que a evolução de  $da/dN$  é idêntica para qualquer  $\theta$ , mas que  $da/dN$  e  $\Delta K$  assumem valores mais elevados se se admitir um valor de  $\theta$  maior. Em relação ao defeito presente no cordão de soldadura, concluiu-se que  $da/dN$  é maior para o ponto menos profundo, quer se considere um defeito embebido quer se considere um defeito superficial.

O número de ciclos previsto,  $N$ , foi determinado para os pontos mais e menos profundos de um defeito embebido e superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo, assim como para um defeito embebido e superficial na tampa, considerando dois grupos de constantes do material. Concluiu-se que  $N$  previsto é sempre menor para uma microestrutura austenítica e maior para uma microestrutura ferrítico-perlítica.

Concluiu-se também que  $N$  é menor para os pontos menos profundos do cordão de soldadura, e que por isso, este tem um efeito notável no número de ciclos que o componente suporta. A razão de assim ser é porque na superfície (zona menos profunda), junto do cordão de soldadura, existe maior concentração de tensões, o que implica uma maior gama dos fatores de intensidade de tensões. Por esse motivo, o componente efetua um menor número de ciclos de vida quando considerando o ponto menos profundo e efetua um maior número de ciclos de vida quando considerando o ponto mais profundo.

Quando se comparou o número de ciclos realizados,  $N$ , entre os defeitos embebido e superficial concluiu-se que o defeito superficial apresenta um menor valor de  $N$  para o componente, quer no caso da zona central do corpo quer no caso da zona no topo da tampa.

Analizando os gráficos de tamanho de fenda,  $a$ , versus número de ciclos realizados,  $N$ , concluiu-se que  $N$  é tanto maior quanto menor for a direção de propagação admitida,  $\theta$ , quer para um defeito embebido como para um defeito superficial, e tanto para a zona central do corpo como para a zona do topo da tampa.

Observando os gráficos da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , versus a altura da fenda,  $a$ , concluiu-se que  $\Delta K$  é tanto maior quanto maior for a direção de propagação,  $\theta$ , e quanto maior for a altura da fenda,  $a$ . Nestes gráficos considerou-se que o comprimento total do defeito mantém a relação relativamente à altura total do mesmo, sendo o comprimento total igual a 4 vezes a altura total, para todos os defeitos considerados (o parâmetro  $c$  foi definido como função do parâmetro  $a$ ).

Comparando o número de ciclos realizados,  $N$ , entre o caso de um defeito no corpo e o caso de um defeito na tampa, concluiu-se que o defeito presente na tampa apresenta um valor de  $N$  estimado bastante mais elevado que o defeito presente no corpo. Considerando uma microestrutura austenítica, um valor de  $\theta$  igual a  $15^\circ$ , e um defeito embebido no corpo, previram-se 3386 ciclos para o ponto mais profundo e 252 ciclos para o ponto menos profundo, e para um defeito embebido na tampa, previram-se 79008 ciclos. Isto indica que a presença do cordão de soldadura foi crítica para o defeito presente no corpo, visto que o defeito na zona da tampa não tinha na proximidade nenhum cordão de soldadura.

Analizando os gráficos e tabelas do número de ciclos de vida previstos para o componente,  $N$ , concluiu-se que o número de ciclos de vida do componente, para o defeito no corpo considerado, é muito reduzido, não traduzindo a durabilidade do componente em serviço. Este facto demonstrou que se arbitrou valores do tamanho inicial dos defeitos demasiado elevados (parâmetros  $a$  e  $c$ ) e também que possivelmente se arbitrou uma largura do cordão de soldadura demasiado elevada (resultando numa zona termicamente afetada maior), o que tornou a análise demasiado conservativa.

Concluiu-se ainda que a durabilidade do componente para o defeito na tampa apresenta os valores mais elevados.

O componente sofreu fadiga prematuramente porque não foram considerados os modos de vibração do mesmo, nem foram considerados os efeitos de concentração de tensões junto dos cordões de soldadura durante o projeto do mesmo.

Para trabalhos futuros, o autor propõe:

- Aplicar a metodologia usada nesta dissertação no âmbito de estudar o mesmo componente, calculando a gama fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , e consequente o número de ciclos previstos,  $N$ , para diferentes valores de tamanho

inicial do defeito de fabrico, e concluir o efeito do mesmo no número de ciclos previstos.

- Aplicar também a metodologia para o mesmo componente, e calcular  $\Delta K$  e  $N$ , para diferentes valores de profundidade de um defeito de fabrico embebido, e concluir o efeito da mesma no número de ciclos previstos.
- Aplicar ainda a metodologia para o mesmo componente, e calcular  $\Delta K$  e  $N$ , para diferentes valores de largura do cordão, e concluir o efeito da mesma no número de ciclos previstos.
- Aplicar a mesma metodologia a outros casos de componentes sujeitos a vibrações que ruíram por fadiga e comparar o número de ciclos de vida previstos com o número de ciclos realizados em serviço.
- Realizar a simulação numérica para um modelo mais detalhado para obter valores de deformações e tensões equivalentes mais aproximados dos valores em serviço.
- Realizar a simulação numérica com um maior número de elementos e uma massa mais próxima da do componente em serviço, para determinar com maior precisão cada modo de vibração e as respetivas frequências.
- Obter, para este mesmo caso, as gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , por simulação numérica, o integral  $J$ , e conseguinte número de ciclos previstos até à ruína,  $N$ , e comparar com os resultados obtidos na presente dissertação.



## Bibliografia

- [1] T. L. M. Morgado, C. M. Branco, and V. Infante, “A failure study of housing of the gearboxes of series 2600 locomotives of the Portuguese Railway Company,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, no. 1–2, pp. 154–164, 2008.
- [2] *BSI Standards Publication - Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. The British Standards Institution, 2015.
- [3] *ASM Handbook. Volume 06A, Welding Fundamentals and Processes*. ASM International, 2011.
- [4] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, and K. S. V. Sekar, *Manufacturing engineering and technology*, 7th ed. Pearson Education, Inc., 2014.
- [5] C. M. Branco, A. A. Fernandes, and P. M. S. T. Castro, *Fadiga de estruturas soldadas*, 2nd ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [6] C. M. Branco, *Mecânica dos Materiais*, 5th ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.
- [7] W. Hu, Z. Liu, D. Liu, and X. Hai, “Fatigue failure analysis of high speed train gearbox housings,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 73, pp. 57–71, 2017.
- [8] B. Zhang, A. C. C. Tan, and J. hui Lin, “Gearbox fault diagnosis of high-speed railway train,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 66, pp. 407–420, 2016.
- [9] C. M. Sonsino, “Structural durability of cast aluminium gearbox housings of underground railway vehicles under variable amplitude loading,” *Int. J. Fatigue*, vol. 27, pp. 944–953, 2005.
- [10] A. Kumar, H. Jaiswal, A. Pandey, and P. P. Patil, “Free Vibration Analysis of Truck Transmission Housing Based on FEA,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, pp. 1588–1592, 2014.
- [11] C. Moolwan and S. Netpu, “Failure Analysis of a Two High Gearbox Shaft,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 88, pp. 154–163, 2013.
- [12] A. Göksenli and I. B. Eryürek, “Failure analysis of an elevator drive shaft,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 16, no. 4, pp. 1011–1019, 2009.
- [13] G. Van Zyl and A. Al-sahli, “Failure analysis of conveyor pulley shaft,” *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 1, no. 2, pp. 144–155, 2013.
- [14] P. Darcis, D. Santarosa, N. Recho, and T. Lassen, “A fracture mechanics approach for the crack growth in welded joints with reference to BS 7910,” *Eur. Conf. Fract. 15 - Adv. Fract. Mech. Life Saf. Assessments*, 2004.
- [15] M. J. Ottersböck, M. Leitner, M. Stoschka, and W. Maurer, “Effect of Weld Defects on the Fatigue Strength of Ultra High-strength Steels,” *Procedia Eng.*, vol. 160, pp. 214–222, 2016.
- [16] Y. Seko, Y. Imai, M. Mitsuya, N. Oguchi, and F. Minami, “Effects of crack configuration and residual stress on fracture driving force for welded joint with embedded flaw,”

- Procedia Struct. Integr.*, vol. 2, pp. 1708–1715, 2016.
- [17] J. H. L. Pang, H. J. Hoh, K. S. Tsang, J. Low, S. C. Kong, and W. G. Yuan, “Fatigue crack propagation analysis for multiple weld toe cracks in cut-out fatigue test specimens from a girth welded pipe,” *Int. J. Fatigue*, vol. 94, pp. 158–165, 2017.
- [18] *Abaqus 6.14 - Theory Guide*. Dassault Systèmes, 2014.

## Anexo A - Códigos das rotinas em Octave

### A.1. Códigos das rotinas do Conjunto A

#### A.1.1. Código da rotina do Conjunto A respectivo ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto mais profundo de um defeito elíptico embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa, com os parâmetros  $a$ ,  $c$  e  $\theta$  independentes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_DeepPoint_ind_teta_c_a(a,c,p,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,delta
S_m,deltaS_b)

res=zeros(length(c),length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        for jj=1:1:length(c)

            M=1;
            B_linha=2*a(kk)+2*p;

            if 2*c(jj)/W<0.8
                f_w=(sec((pi*c(jj)/W)*(2*a(kk)/B_linha)^0.5))^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c(jj))>=0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                fi=(1+1.464*(a(kk)/c(jj))^1.65)^0.5;
            elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
                fi=(1+1.464*(c(jj)/a(kk))^1.65)^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1) &&
((a(kk)/B_linha)<0.625*((a(kk)/c(jj))+0.6)) || ~(a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1)) ...
&& a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/(2*c(jj))>0 && (2*c(jj))/W<0.5 && teta(ii)>=-
pi && teta(ii)<=pi

                if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                    M_1=1;
                elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
```



```

        M_1=(c(jj)/a(kk))^0.5;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    M_2=0.05/(0.11+(a(kk)/c(jj))^1.5);
    M_3=0.29/(0.23+(a(kk)/c(jj))^1.5);
    g=1-(((2*a(kk)/B_linha)^4*(2.6-
(4*a(kk)/B_linha)^0.5)/(1+4*(a(kk)/c(jj))))*abs(cos(teta(ii))));

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        f_teta=((a(kk)/c(jj))^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        f_teta=((c(jj)/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(2*a(kk)/B_linha)^2+M_3*((2*a(kk))/B_linha)^4)*(g*f_teta)/fi;

    if (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B<=0.1841)
        lambda_1=1.044;
        lambda_2=-2.44;
        lambda_3=0;
        lambda_4=-3.166;

    M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
    elseif (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B>0.1841 && a(kk)/B<=0.125)
        lambda_1=0.94;
        lambda_2=-1.875;
        lambda_3=-0.1146;
        lambda_4=-1.844;

    M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
    elseif (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B>0.1841 && a(kk)/B>0.125)
        lambda_1=1.06;
        lambda_2=-2.2;
        lambda_3=-0.6666;
        lambda_4=-0.6666;

    M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
    elseif teta(ii)~=pi/2
        M_b=1;
    else

```

```

    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

```

#Estas equacoes do M\_km e M\_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.

#Z\_1\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_1*((a/B_{linha})*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_2\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_2*(a/B)$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B_{linha})*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

```

    if a(kk)/B>0.005 && a(kk)/B<0.9 && a(kk)/c(jj)>=0.1 && a(kk)/c(jj)<=1 &&
    L/B>=0.5 && L/B<=2.75

```

```

        g_1_M_km=-1.0343*(a(kk)/c(jj))^2-0.15657*(a(kk)/c(jj))+1.3409;

```

```

        g_2_M_km=1.3218*(a(kk)/c(jj))^-0.61153;

```

```

        g_3_M_km=-0.87238*(a(kk)/c(jj))+1.2788;

```

```

        g_4_M_km=-0.46190*(a(kk)/c(jj))^3+0.67090*(a(kk)/c(jj))^2-
        0.37571*(a(kk)/c(jj))+4.6511;

```

```

        g_5_M_km=-0.015647*(L/B)^3+0.090889*(L/B)^2-0.17180*(L/B)-0.24587;

```

```

        g_6_M_km=-0.20136*(L/B)^2+0.93311*(L/B)-0.41496;

```

```

        g_7_M_km=0.20188*(L/B)^2-0.97857*(L/B)+0.068225;

```

```

        g_8_M_km=-0.027338*(L/B)^2+0.12551*(L/B)-11.218;

```

```

    else

```

```

        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;

```

```

        continue

```

```

    endif

```

```

Z_1_M_km=0.43358*(a(kk)/B)^(g_1_M_km+(g_2_M_km*(a(kk)/B))^g_3_M_km)+0.93163*exp((a(kk)/B)^-0.050966)+g_4_M_km;

```

```

Z_2_M_km=-0.21521*(1-(a(kk)/B))^176.4199+2.8141*(a(kk)/B)^(-
0.10740*(a(kk)/B));

```

```

Z_3_M_km=0.33994*(a(kk)/B)^g_5_M_km+1.9493*(a(kk)/B)^0.23003+(g_6_M_km*(a(kk)/B)^2+g_7_M_km*(a(kk)/B)+g_8_M_km);

```

```

M_km=Z_1_M_km+Z_2_M_km+Z_3_M_km;

```

#Z\_1\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_1*((a/B_{linha})*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de flexao

#Z\_2\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_2*(a/B)$  apresentada na norma para as tensoes de flexao

#Z\_3\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B_{linha})*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de flexao

```

    if a(kk)/B>=0.005 && a(kk)/B<=0.9 && a(kk)/c(jj)>=0.1 && a(kk)/c(jj)<=1 &&
    L/B>=0.5 && L/B<=2.75

```

```

        g_1_M_kb=-0.014992*(a(kk)/c(jj))^2-0.021401*(a(kk)/c(jj))-0.23851;

```

```

        g_2_M_kb=0.61775*(a(kk)/c(jj))^-1.0278;

```

```

        g_3_M_kb=0.00013242*(a(kk)/c(jj))-1.4744;

```

```

        g_4_M_kb=-0.28783*(a(kk)/c(jj))^3+0.58706*(a(kk)/c(jj))^2-
        0.37198*(a(kk)/c(jj))-0.89887;

```

```

        g_5_M_kb=-17.195*(a(kk)/B)^2+12.468*(a(kk)/B)-0.51662;

```

```

g_6_M_kb=-0.059798*(L/B)^3+0.38091*(L/B)^2-0.8022037*(L/B)+0.31906;
g_7_M_kb=-0.35848*(L/B)^2+1.3975*(L/B)-1.7535;
g_8_M_kb=0.31288*(L/B)^2-1.3599*(L/B)+1.6611;
g_9_M_kb=-0.0014701*(L/B)^2-0.0025074*(L/B)-0.0089846;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

Z_1_M_kb=0.065916*(a(kk)/B)^(g_1_M_kb+(g_2_M_kb*(a(kk)/B))^g_3_M_kb)+0.52086*exp((a(kk)/B)^-0.10364)+g_4_M_kb;
Z_2_M_kb=-0.02195*(1-(a(kk)/B))^2.8086+0.021403*(a(kk)/B)^g_5_M_kb;
Z_3_M_kb=0.23344*(a(kk)/B)^g_6_M_kb-0.14827*(a(kk)/B)^-0.20077+(g_7_M_kb*(a(kk)/B)^2+g_8_M_kb*(a(kk)/B)+g_9_M_kb);

M_kb=Z_1_M_kb+Z_2_M_kb+Z_3_M_kb;

Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_fb*M_kb*M_b*deltaS_b);
res(jj, kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_DeepPoint_Matriz_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');
    for xii=1:1:xteta

        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid,'teta:%c%4.3f\na\\\c:%c',csv,vteta(xii)*180/pi,csv);
        for xjj=1:1:xc
            fprintf(fid,'%4.3f%c',vc(xjj),csv);
        endfor
        fprintf(fid,'\n');

        for xkk=1:1:xa

            #imprime legendas dos eixos
            fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

            for xjj=1:1:xc
                if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido
                    fprintf(fid,'%c',csv);
                end
            end
        end
    end
endfunction

```

```

        elseif
            fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xjj,xkk,xii),csv);
        endif
    endfor

    fprintf(fid,'\n');
endfor
fprintf(fid,'\n\n');
endfor
fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_DeepPoint_DB_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'teta%cc%ca%cdeltaK\n',csv,csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xjj=1:1:xc
            for xkk=1:1:xa
                if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv);
                    elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv,xre
s(xjj,xkk,xii));
                    endif
                endfor
            endfor
        endfor
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

### A.1.2. Código da rotina do Conjunto A respectivo ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto menos profundo de um defeito elíptico embebido no cordão de soldura na zona central do corpo da caixa, com os parâmetros  $a$ ,  $c$  e  $\theta$  independentes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_SurfacePoint_ind_teta_c_a(a,c,p,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS
_m,deltaS_b)

res=zeros(length(c),length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

for kk=1:1:length(a)

for jj=1:1:length(c)

M=1;
B_linha=2*a(kk)+2*p;

if 2*c(jj)/W<0.8
f_w=(sec((pi*c(jj)/W)*(2*a(kk)/B_linha)^0.5))^0.5;
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>=0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
fi=(1+1.464*(a(kk)/c(jj))^1.65)^0.5;
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
fi=(1+1.464*(c(jj)/a(kk))^1.65)^0.5;
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif

if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1) &&
((a(kk)/B_linha)<0.625*((a(kk)/c(jj))+0.6)) || ~(a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1)) ...
&& a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/(2*c(jj))>0 && (2*c(jj)/W<0.5 && teta(ii)>=
pi && teta(ii)<=pi

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
M_1=1;
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
M_1=(c(jj)/a(kk))^0.5;
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif
```

```

M_2=0.05/(0.11+(a(kk)/c(jj))^1.5);
M_3=0.29/(0.23+(a(kk)/c(jj))^1.5);
g=1-(((2*a(kk)/B_linha)^4*(2.6-
(4*a(kk)/B_linha)^0.5)/(1+4*(a(kk)/c(jj))))*abs(cos(teta(ii)));

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    f_teta=((a(kk)/c(jj))^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    f_teta=((c(jj)/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(2*a(kk)/B_linha)^2+M_3*((2*a(kk))/B_linha)^4)*(g*f_teta)/fi;

if (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B<=0.1841)
    lambda_1=1.044;
    lambda_2=-2.44;
    lambda_3=0;
    lambda_4=-3.166;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B>0.1841 && a(kk)/B<=0.125)
    lambda_1=0.94;
    lambda_2=-1.875;
    lambda_3=-0.1146;
    lambda_4=-1.844;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B>0.1841 && a(kk)/B>0.125)
    lambda_1=1.06;
    lambda_2=-2.2;
    lambda_3=-0.6666;
    lambda_4=-0.6666;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif teta(ii)~=pi/2
    M_b=1;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

```

#Estas equacoes do M\_km e M\_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.

#Z\_1\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_1*((a/B\_linha)*(c/a)*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_2\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_2*((a/B\_linha)*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B\_linha)*(a/c\_linha)*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

if  $a(kk)/B > 0.005$  &&  $a(kk)/B < 0.9$  &&  $a(kk)/c(jj) \geq 0.1$  &&  $a(kk)/c(jj) \leq 1$  &&  $L/B \geq 0.5$  &&  $L/B \leq 2.75$

```
g_1_M_km=0.0078157*(c(jj)/a(kk))^2-0.070664*(c(jj)/a(kk))+1.8508;
g_2_M_km=-0.000054546*(L/B)^2+0.00013651*(L/B)-0.00047844;
g_3_M_km=0.00049192*(L/B)^2-0.0013595*(L/B)+0.011400;
g_4_M_km=0.0071654*(L/B)^2-0.033399*(L/B)-0.25064;
g_5_M_km=-0.018640*(c(jj)/a(kk))^2+0.24311*(c(jj)/a(kk))-1.7644;
g_6_M_km=-0.0016713*(L/B)^2+0.0090620*(L/B)-0.016479;
g_7_M_km=-0.0031615*(L/B)^2-0.010944*(L/B)+0.13967;
g_8_M_km=-0.045206*(L/B)^3+0.32380*(L/B)^2-0.68935*(L/B)+1.4954;
g_9_M_km=-0.25473*(a(kk)/c(jj))^2+0.40928*(a(kk)/c(jj))+0.0021892;
g_10_M_km=37.423*(a(kk)/c(jj))^2-15.741*(a(kk)/c(jj))+64.903;
g_11_M_km=-0.10553*(L/B)^3+0.59894*(L/B)^2-1.0942*(L/B)-1.2650;
g_12_M_km=0.043891*(L/B)^3-0.24898*(L/B)^2+0.44732*(L/B)+0.60136;
g_13_M_km=-0.011411*(a(kk)/c(jj))^2+0.0043695*(a(kk)/c(jj))+0.51732;
```

else

res(jj, kk, ii)=valor\_invalido;

continue

endif

$Z_1\_M\_km = g_1\_M\_km * (a(kk)/B)^{(g_2\_M\_km * (c(jj)/a(kk))^2 + g_3\_M\_km * (c(jj)/a(kk)) + g_4\_M\_km) + g_5\_M\_km * (1 - (a(kk)/B)^{(g_6\_M\_km * (c(jj)/a(kk))^2 + g_7\_M\_km * (c(jj)/a(kk)) + g_8\_M\_km)}}$

$Z_2\_M\_km = (-0.28639 * (a(kk)/c(jj))^2 + 0.35411 * (a(kk)/c(jj)) + 1.6430) * (a(kk)/B)^{g_9\_M\_km} + 0.27449 * (1 - (a(kk)/B)^{g_{10\_M\_km}}}$

$Z_3\_M\_km = g_{11\_M\_km} * (a(kk)/B)^{0.75429} + g_{12\_M\_km} * \exp((a(kk)/B)^{g_{13\_M\_km}})$

$M\_km = Z_1\_M\_km * Z_2\_M\_km * Z_3\_M\_km;$

#Z\_1\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_1*((a/B\_linha)*(c/a)*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_2\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_2*((a/B\_linha)*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B\_linha)*(a/c\_linha)*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

if  $a(kk)/B \geq 0.005$  &&  $a(kk)/B \leq 0.9$  &&  $a(kk)/c(jj) \geq 0.1$  &&  $a(kk)/c(jj) \leq 1$  &&  $L/B \geq 0.5$  &&  $L/B \leq 2.75$

```
g_1_M_kb=0.0023232*(c(jj)/a(kk))^2-0.00037156*(c(jj)/a(kk))+4.5985;
g_2_M_kb=-0.000044010*(L/B)^2+0.00014425*(L/B)-0.00086706;
g_3_M_kb=0.00039951*(L/B)^2-0.0013715*(L/B)+0.014251;
g_4_M_kb=0.0046169*(L/B)^2-0.017917*(L/B)-0.16335;
g_5_M_kb=-0.018524*(c(jj)/a(kk))^2+0.27810*(c(jj)/a(kk))-5.4253;
g_6_M_kb=-0.00037981*(L/B)^2+0.0025078*(L/B)+0.00014693;
```

```

g_7_M_kb=-0.0038508*(L/B)^2+0.0023212*(L/B)-0.026862;
g_8_M_kb=-0.011911*(L/B)^3+0.082625*(L/B)^2-0.16086*(L/B)+1.2302;
g_9_M_kb=0.27798*(a(kk)/B)^3-1.2144*(a(kk)/B)^2-
2.4680*(a(kk)/B)+0.099981;
g_10_M_kb=-0.25922*(a(kk)/c(jj))^2+0.39566*(a(kk)/c(jj))+0.011759;
g_11_M_kb=6.5974*(a(kk)/c(jj))^2+55.787*(a(kk)/c(jj))+37.053;
g_12_M_kb=-0.14895*(L/B)^3+0.81526*(L/B)^2-1.4795*(L/B)-0.89808;
g_13_M_kb=0.055459*(L/B)^3-0.30180*(L/B)^2+0.54154*(L/B)+0.53433;
g_14_M_kb=-0.01343*(a(kk)/c(jj))^2+0.0066702*(a(kk)/c(jj))+0.75939;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

Z_1_M_kb=g_1_M_kb*(a(kk)/B)^(g_2_M_kb*(c(jj)/a(kk))^2+g_3_M_kb*(c(jj)/a(kk))+g_4_
M_kb)+g_5_M_kb*(1-
(a(kk)/B))^(g_6_M_kb*(c(jj)/a(kk))^2+g_7_M_kb*(c(jj)/a(kk))+g_8_M_kb)+g_9_M_kb;
Z_2_M_kb=(-
0.35006*(a(kk)/c(jj))^2+0.40768*(a(kk)/c(jj))+1.7053)*(a(kk)/B)^g_10_M_kb+0.24988*(1-
(a(kk)/B))^g_11_M_kb;

Z_3_M_kb=g_12_M_kb*(a(kk)/B)^0.94761+g_13_M_kb*exp((a(kk)/B)^g_14_M_kb);

M_kb=Z_1_M_kb*Z_2_M_kb*Z_3_M_kb;

Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_tb*M_kb*M_b*deltaS_b);
res(jj, kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_SurfacePoint_Matriz_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');
    for xii=1:1:xteta

        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid,teta:%c%4.3f\n\\c:%c',csv,vteta(xii)*180/pi,csv);
        for xjj=1:1:xc
            fprintf(fid,'%4.3f%c',vc(xjj),csv);
        endfor
        fprintf(fid,'\n');
    endfor

```



```

for xkk=1:1:xa

    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

    for xjj=1:1:xc
        if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido
            fprintf(fid,'%c',csv);
        elseif
            fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xjj,xkk,xii),csv);
        endif
    endfor

    fprintf(fid,'\n');
endfor
fprintf(fid,'\n\n');
endfor
fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_SurfacePoint_DB_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'teta%cc%ca%cdeltaK\n',csv,csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xjj=1:1:xc
            for xkk=1:1:xa
                if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv);
                elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv,xres(xjj,xkk,xii));
                endif
            endfor
        endfor
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

### A.1.3. Código da rotina do Conjunto A respectivo ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto mais profundo de um defeito semi-elíptico superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa, com os parâmetros  $a$ ,  $c$  e  $\theta$  independentes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_DeepPoint_ind_teta_c_a(a,c,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS
_m,deltaS_b)

res=zeros(length(c),length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

for kk=1:1:length(a)

for jj=1:1:length(c)

M=1;

if 2*c(jj)/W<0.8
f_w=(sec((pi*c(jj)/W)*(a(kk)/B)^0.5))^0.5;
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>=0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
fi=(1+1.464*(a(kk)/c(jj))^1.65)^0.5;
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
fi=(1+1.464*(c(jj)/a(kk))^1.65)^0.5;
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif

if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c(jj)+0.6))
|| (a(kk)/(2*c(jj))>0.1 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
M_1=1.13-0.09*(a(kk)/c(jj));
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
M_1=(c(jj)/a(kk))^0.5*(1+0.04*(c(jj)/a(kk)));
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
```

```

        M_2=(0.89/(0.2+(a(kk)/c(jj))))-0.54;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        M_2=0.2*(c(jj)/a(kk))^4;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        M_3=0.5-(1/(0.65+(a(kk)/c(jj))))+14*(1-(a(kk)/c(jj)))^24;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        M_3=-0.11*(c(jj)/a(kk))^4;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        g=1+(0.1+0.35*(a(kk)/B)^2*(1-sin(teta(ii))))^2;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        g=1+(0.1+0.35*(c(jj)/a(kk))*(a(kk)/B)^2*(1-sin(teta(ii))))^2;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        f_teta=((a(kk)/c(jj))^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        f_teta=((c(jj)/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    M_m=(M_1+M_2*(a(kk)/B)^2+M_3*(a(kk)/B)^4)*(g*f_teta)/fi;

    if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c(jj)+0.6))
    || (a(kk)/(2*c(jj))>0.1 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
        a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        G_1=-1.22-0.12*(a(kk)/c(jj));
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        G_1=-2.11+0.77*(c(jj)/a(kk));
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

```

```

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    G_2=0.55-1.05*(a(kk)/c(jj))^0.75+0.47*(a(kk)/c(jj))^1.5;
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    G_2=0.55-0.72*(c(jj)/a(kk))^0.75+0.14*(c(jj)/a(kk))^1.5;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    q=0.2+(a(kk)/c(jj))+0.6*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    q=0.2+(c(jj)/a(kk))+0.6*(a(kk)/B);
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    H_1=1-0.34*(a(kk)/B)-0.11*(a(kk)/c(jj))*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    H_1=1-(0.04+0.41*(c(jj)/a(kk)))*(a(kk)/B)+(0.55-
1.93*(c(jj)/a(kk))^0.75+1.38*(c(jj)/a(kk))^1.5)*(a(kk)/B)^2;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

H_2=1+G_1*(a(kk)/B)+G_2*(a(kk)/B)^2;

H=H_1+(H_2-H_1)*sin(teta(ii))^q;

else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_b=H*M_m;

#Estas equacoes do M_km e M_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.

#Z_1_M_km corresponde a toda a expressao f_1*((a/B_linha)*(a/c)) apresentada na
norma para as tensoes de membrana
#Z_2_M_km corresponde a toda a expressao f_2*(a/B) apresentada na norma para
as tensoes de membrana
#Z_3_M_km corresponde a toda a expressao f_3*((a/B_linha)*(L/B)) apresentada
na norma para as tensoes de membrana

if a(kk)/B>0.005 && a(kk)/B<0.9 && a(kk)/c(jj)>=0.1 && a(kk)/c(jj)<=1 &&
L/B>=0.5 && L/B<=2.75
    g_1_M_km=-1.0343*(a(kk)/c(jj))^2-0.15657*(a(kk)/c(jj))+1.3409;
    g_2_M_km=1.3218*(a(kk)/c(jj))^-0.61153;
    g_3_M_km=-0.87238*(a(kk)/c(jj))+1.2788;
    g_4_M_km=-0.46190*(a(kk)/c(jj))^3+0.67090*(a(kk)/c(jj))^2-
0.37571*(a(kk)/c(jj))+4.6511;

```

```

g_5_M_km=-0.015647*(L/B)^3+0.090889*(L/B)^2-0.17180*(L/B)-0.24587;
g_6_M_km=-0.20136*(L/B)^2+0.93311*(L/B)-0.41496;
g_7_M_km=0.20188*(L/B)^2-0.97857*(L/B)+0.068225;
g_8_M_km=-0.027338*(L/B)^2+0.12551*(L/B)-11.218;
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif

```

```

Z_1_M_km=0.43358*(a(kk)/B)^(g_1_M_km+(g_2_M_km*(a(kk)/B))^g_3_M_km)+0.93163*exp((a(kk)/B)^-0.050966)+g_4_M_km;

```

```

Z_2_M_km=-0.21521*(1-(a(kk)/B))^176.4199+2.8141*(a(kk)/B)^(-0.10740*(a(kk)/B));

```

```

Z_3_M_km=0.33994*(a(kk)/B)^g_5_M_km+1.9493*(a(kk)/B)^0.23003+(g_6_M_km*(a(kk)/B)^2+g_7_M_km*(a(kk)/B)+g_8_M_km);

```

```

M_km=Z_1_M_km+Z_2_M_km+Z_3_M_km;

```

#Z\_1\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_1\*((a/B\_linha)\*(a/c)) apresentada na norma para as tensoes de flexao

#Z\_2\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_2\*(a/B) apresentada na norma para as tensoes de flexao

#Z\_3\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_3\*((a/B\_linha)\*(L/B)) apresentada na norma para as tensoes de flexao

```

if a(kk)/B>=0.005 && a(kk)/B<=0.9 && a(kk)/c(jj)>=0.1 && a(kk)/c(jj)<=1 && L/B>=0.5 && L/B<=2.75

```

```

g_1_M_kb=-0.014992*(a(kk)/c(jj))^2-0.021401*(a(kk)/c(jj))-0.23851;
g_2_M_kb=0.61775*(a(kk)/c(jj))-1.0278;
g_3_M_kb=0.00013242*(a(kk)/c(jj))-1.4744;
g_4_M_kb=-0.28783*(a(kk)/c(jj))^3+0.58706*(a(kk)/c(jj))^2-0.37198*(a(kk)/c(jj))-0.89887;
g_5_M_kb=-17.195*(a(kk)/B)^2+12.468*(a(kk)/B)-0.51662;
g_6_M_kb=-0.059798*(L/B)^3+0.38091*(L/B)^2-0.8022037*(L/B)+0.31906;
g_7_M_kb=-0.35848*(L/B)^2+1.3975*(L/B)-1.7535;
g_8_M_kb=0.31288*(L/B)^2-1.3599*(L/B)+1.6611;
g_9_M_kb=-0.0014701*(L/B)^2-0.0025074*(L/B)-0.0089846;
else
res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
continue
endif

```

```

Z_1_M_kb=0.065916*(a(kk)/B)^(g_1_M_kb+(g_2_M_kb*(a(kk)/B))^g_3_M_kb)+0.52086*exp((a(kk)/B)^-0.10364)+g_4_M_kb;

```

```

Z_2_M_kb=-0.02195*(1-(a(kk)/B))^2.8086+0.021403*(a(kk)/B)^g_5_M_kb;

```

```

Z_3_M_kb=0.23344*(a(kk)/B)^g_6_M_kb-0.14827*(a(kk)/B)^-0.20077+(g_7_M_kb*(a(kk)/B)^2+g_8_M_kb*(a(kk)/B)+g_9_M_kb);

```

```

M_kb=Z_1_M_kb+Z_2_M_kb+Z_3_M_kb;

```

```

Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_tb*M_kb*M_b*deltaS_b);

```

```

        res(jj, kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

    endfor

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_DeepstPoint_Matriz_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');
    for xii=1:1:xteta

        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid,'teta:%c%4.3f\na\\\c:%c',csv,vteta(xii)*180/pi,csv);
        for xjj=1:1:xc
            fprintf(fid,'%4.3f%c',vc(xjj),csv);
        endfor
        fprintf(fid,'\n');

        for xkk=1:1:xa

            #imprime legendas dos eixos
            fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

            for xjj=1:1:xc
                if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido
                    fprintf(fid,'%c',csv);
                elseif
                    fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xjj,xkk,xii),csv);
                endif
            endfor

            fprintf(fid,'\n');
        endfor
        fprintf(fid,'\n\n');
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_DeepstPoint_DB_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho

```

```

fprintf(fid,'teta%cc%ca%cdeltaK\n',csv,csv,csv);

for xii=1:1:xteta
    for xjj=1:1:xc
        for xkk=1:1:xa
            if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv);
                elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv,xre
s(xjj,xkk,xii));
                    endif
                endfor
            endfor
        endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

#### A.1.4. Código da rotina do Conjunto A respectivo ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto menos profundo de um defeito semi-elíptico superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa, com os parâmetros  $a$ ,  $c$  e  $\theta$  independentes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_SurfacePoint_ind_teta_c_a(a,c,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_
m,deltaS_b)

res=zeros(length(c),length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        for jj=1:1:length(c)

            M=1;

            if 2*c(jj)/W<0.8
                f_w=(sec((pi*c(jj)/W)*(a(kk)/B)^0.5))^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c(jj))>=0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                fi=(1+1.464*(a(kk)/c(jj))^1.65)^0.5;
            elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
                fi=(1+1.464*(c(jj)/a(kk))^1.65)^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c(jj)+0.6))
|| (a(kk)/(2*c(jj))>0.1 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
                a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

                if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                    M_1=1.13-0.09*(a(kk)/c(jj));
                elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
                    M_1=(c(jj)/a(kk))^0.5*(1+0.04*(c(jj)/a(kk)));
                else
                    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                    continue
                endif

                if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
```



```

        M_2=(0.89/(0.2+(a(kk)/c(jj))))-0.54;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        M_2=0.2*(c(jj)/a(kk))^4;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        M_3=0.5-(1/(0.65+(a(kk)/c(jj))))+14*(1-(a(kk)/c(jj)))^24;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        M_3=-0.11*(c(jj)/a(kk))^4;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        g=1+(0.1+0.35*(a(kk)/B)^2*(1-sin(teta(ii))))^2;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        g=1+(0.1+0.35*(c(jj)/a(kk))*(a(kk)/B)^2*(1-sin(teta(ii))))^2;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        f_teta=((a(kk)/c(jj))^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        f_teta=((c(jj)/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    M_m=(M_1+M_2*(a(kk)/B)^2+M_3*(a(kk)/B)^4)*(g*f_teta)/fi;

    if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c(jj)+0.6))
    || (a(kk)/(2*c(jj))>0.1 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
        a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        G_1=-1.22-0.12*(a(kk)/c(jj));
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        G_1=-2.11+0.77*(c(jj)/a(kk));
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

```

```

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    G_2=0.55-1.05*(a(kk)/c(jj))^0.75+0.47*(a(kk)/c(jj))^1.5;
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    G_2=0.55-0.72*(c(jj)/a(kk))^0.75+0.14*(c(jj)/a(kk))^1.5;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    q=0.2+(a(kk)/c(jj))+0.6*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    q=0.2+(c(jj)/a(kk))+0.6*(a(kk)/B);
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    H_1=1-0.34*(a(kk)/B)-0.11*(a(kk)/c(jj))*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    H_1=1-(0.04+0.41*(c(jj)/a(kk)))*(a(kk)/B)+(0.55-
1.93*(c(jj)/a(kk))^0.75+1.38*(c(jj)/a(kk))^1.5)*(a(kk)/B)^2;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

H_2=1+G_1*(a(kk)/B)+G_2*(a(kk)/B)^2;

H=H_1+(H_2-H_1)*sin(teta(ii))^q;

else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_b=H*M_m;

#Estas equacoes do M_km e M_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.

#Z_1_M_km corresponde a toda a expressao f_1*((a/B_linha)*(c/a)*(L/B))
apresentada na norma para as tensoes de membrana
#Z_2_M_km corresponde a toda a expressao f_2*((a/B_linha)*(a/c)) apresentada na
norma para as tensoes de membrana
#Z_3_M_km corresponde a toda a expressao f_3*((a/B_linha)*(a/c_linha)*(L/B))
apresentada na norma para as tensoes de membrana

if a(kk)/B>0.005 && a(kk)/B<0.9 && a(kk)/c(jj)>=0.1 && a(kk)/c(jj)<=1 &&
L/B>=0.5 && L/B<=2.75
    g_1_M_km=0.0078157*(c(jj)/a(kk))^2-0.070664*(c(jj)/a(kk))+1.8508;
    g_2_M_km=-0.000054546*(L/B)^2+0.00013651*(L/B)-0.00047844;
    g_3_M_km=0.00049192*(L/B)^2-0.0013595*(L/B)+0.011400;
    g_4_M_km=0.0071654*(L/B)^2-0.033399*(L/B)-0.25064;
    g_5_M_km=-0.018640*(c(jj)/a(kk))^2+0.24311*(c(jj)/a(kk))-1.7644;

```

```

g_6_M_km=-0.0016713*(L/B)^2+0.0090620*(L/B)-0.016479;
g_7_M_km=-0.0031615*(L/B)^2-0.010944*(L/B)+0.13967;
g_8_M_km=-0.045206*(L/B)^3+0.32380*(L/B)^2-0.68935*(L/B)+1.4954;
g_9_M_km=-0.25473*(a(kk)/c(jj))^2+0.40928*(a(kk)/c(jj))+0.0021892;
g_10_M_km=37.423*(a(kk)/c(jj))^2-15.741*(a(kk)/c(jj))+64.903;
g_11_M_km=-0.10553*(L/B)^3+0.59894*(L/B)^2-1.0942*(L/B)-1.2650;
g_12_M_km=0.043891*(L/B)^3-0.24898*(L/B)^2+0.44732*(L/B)+0.60136;
g_13_M_km=-0.011411*(a(kk)/c(jj))^2+0.0043695*(a(kk)/c(jj))+0.51732;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

```

```

Z_1_M_km=g_1_M_km*(a(kk)/B)^((g_2_M_km*(c(jj)/a(kk))^2)+g_3_M_km*(c(jj)/a(kk))+g_
4_M_km)+g_5_M_km*(1-
(a(kk)/B))^((g_6_M_km*(c(jj)/a(kk))^2)+g_7_M_km*(c(jj)/a(kk))+g_8_M_km);
Z_2_M_km=(-
0.28639*(a(kk)/c(jj))^2+0.35411*(a(kk)/c(jj))+1.6430)*(a(kk)/B)^g_9_M_km+0.27449*(1-
(a(kk)/B))^g_10_M_km;

```

```

Z_3_M_km=g_11_M_km*(a(kk)/B)^0.75429+g_12_M_km*exp((a(kk)/B)^g_13_M_km);

```

```

M_km=Z_1_M_km*Z_2_M_km*Z_3_M_km;

```

#Z\_1\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_1\*((a/B\_linha)\*(c/a)\*(L/B))  
apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_2\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_2\*((a/B\_linha)\*(a/c)) apresentada na  
norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_3\*((a/B\_linha)\*(a/c\_linha)\*(L/B))  
apresentada na norma para as tensoes de membrana

```

if a(kk)/B>=0.005 && a(kk)/B<=0.9 && a(kk)/c(jj)>=0.1 && a(kk)/c(jj)<=1 &&
L/B>=0.5 && L/B<=2.75

```

```

g_1_M_kb=0.0023232*(c(jj)/a(kk))^2-0.00037156*(c(jj)/a(kk))+4.5985;
g_2_M_kb=-0.000044010*(L/B)^2+0.00014425*(L/B)-0.00086706;
g_3_M_kb=0.00039951*(L/B)^2-0.0013715*(L/B)+0.014251;
g_4_M_kb=0.0046169*(L/B)^2-0.017917*(L/B)-0.16335;
g_5_M_kb=-0.018524*(c(jj)/a(kk))^2+0.27810*(c(jj)/a(kk))-5.4253;
g_6_M_kb=-0.00037981*(L/B)^2+0.0025078*(L/B)+0.00014693;
g_7_M_kb=-0.0038508*(L/B)^2+0.0023212*(L/B)-0.026862;
g_8_M_kb=-0.011911*(L/B)^3+0.082625*(L/B)^2-0.16086*(L/B)+1.2302;
g_9_M_kb=0.27798*(a(kk)/B)^3-1.2144*(a(kk)/B)^2-
2.4680*(a(kk)/B)+0.099981;
g_10_M_kb=-0.25922*(a(kk)/c(jj))^2+0.39566*(a(kk)/c(jj))+0.011759;
g_11_M_kb=6.5974*(a(kk)/c(jj))^2+55.787*(a(kk)/c(jj))+37.053;
g_12_M_kb=-0.14895*(L/B)^3+0.81526*(L/B)^2-1.4795*(L/B)-0.89808;
g_13_M_kb=0.055459*(L/B)^3-0.30180*(L/B)^2+0.54154*(L/B)+0.53433;
g_14_M_kb=-0.01343*(a(kk)/c(jj))^2+0.0066702*(a(kk)/c(jj))+0.75939;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

```

```

Z_1_M_kb=g_1_M_kb*(a(kk)/B)^(g_2_M_kb*(c(jj)/a(kk))^2+g_3_M_kb*(c(jj)/a(kk))+g_4_
M_kb)+g_5_M_kb*(1-
(a(kk)/B))^(g_6_M_kb*(c(jj)/a(kk))^2+g_7_M_kb*(c(jj)/a(kk))+g_8_M_kb)+g_9_M_kb;
Z_2_M_kb=(-
0.35006*(a(kk)/c(jj))^2+0.40768*(a(kk)/c(jj))+1.7053)*(a(kk)/B)^g_10_M_kb+0.24988*(1-
(a(kk)/B))^g_11_M_kb;

Z_3_M_kb=g_12_M_kb*(a(kk)/B)^0.94761+g_13_M_kb*exp((a(kk)/B)^g_14_M_kb);

M_kb=Z_1_M_kb*Z_2_M_kb*Z_3_M_kb;

Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_tb*M_kb*M_b*deltaS_b);
res(jj, kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

csv='';
filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_SurfacePoint_Matriz_ind_teta_c_a.csv';
fid=fopen(filename, 'w');
for xii=1:1:xteta

#imprime legendas dos eixos
fprintf(fid,'teta:%c%4.3f\n\\c:%c',csv,vteta(xii)*180/pi,csv);
for xjj=1:1:xc
fprintf(fid,'%4.3f%c',vc(xjj),csv);
endfor
fprintf(fid,'\n');

for xkk=1:1:xa

#imprime legendas dos eixos
fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

for xjj=1:1:xc
if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido
fprintf(fid,'%c',csv);
elseif
fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xjj,xkk,xii),csv);
endif
endfor

fprintf(fid,'\n');

```

```

        endfor
        fprintf(fid,'\n\n');
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_SurfacePoint_DB_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'teta%cc%ca%cdeltaK\n',csv,csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xjj=1:1:xc
            for xkk=1:1:xa
                if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv);
                    elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv,xre
s(xjj,xkk,xii));
                endif
            endfor
        endfor
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

### A.1.5. Código da rotina do Conjunto A respetivo a um defeito embebido na tampa

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , de um defeito elíptico embebido na tampa da caixa, com os parâmetros  $a$ ,  $c$  e  $\theta$  independentes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefTampa_DefEmbebido_ind_teta_c_a(a,c,p,B,W,teta,deltaS_m,deltaS_b)

res=zeros(length(c),length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        for jj=1:1:length(c)

            M=1;
            B_linha=2*a(kk)+2*p;

            if 2*c(jj)/W<0.8
                f_w=(sec((pi*c(jj)/W)*(2*a(kk)/B_linha)^0.5))^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c(jj))>=0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                fi=(1+1.464*(a(kk)/c(jj))^1.65)^0.5;
            elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
                fi=(1+1.464*(c(jj)/a(kk))^1.65)^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1) &&
((a(kk)/B_linha)<0.625*((a(kk)/c(jj))+0.6)) || ~(a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1)) ...
&& a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/(2*c(jj))>0 && (2*c(jj))/W<0.5 && teta(ii)>=-
pi && teta(ii)<=pi

                if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                    M_1=1;
                elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
                    M_1=(c(jj)/a(kk))^0.5;
                else
                    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                    continue
                endif

                M_2=0.05/(0.11+(a(kk)/c(jj))^1.5);
```

```

M_3=0.29/(0.23+(a(kk)/c(jj))^1.5);
g=1-(((2*a(kk)/B_linha)^4*(2.6-
(4*a(kk)/B_linha)^0.5)/(1+4*(a(kk)/c(jj))))*abs(cos(teta(ii)));

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    f_teta=((a(kk)/c(jj))^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    f_teta=((c(jj)/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(2*a(kk)/B_linha)^2+M_3*((2*a(kk))/B_linha)^4)*(g*f_teta)/fi;

if (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B<=0.1841)
    lambda_1=1.044;
    lambda_2=-2.44;
    lambda_3=0;
    lambda_4=-3.166;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B>0.1841 && a(kk)/B<=0.125)
    lambda_1=0.94;
    lambda_2=-1.875;
    lambda_3=-0.1146;
    lambda_4=-1.844;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5 && teta(ii)==pi/2) &&
(p/B>0.1841 && a(kk)/B>0.125)
    lambda_1=1.06;
    lambda_2=-2.2;
    lambda_3=-0.6666;
    lambda_4=-0.6666;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif teta(ii)~=pi/2
    M_b=1;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

Y_deltaSigma=M*f_w*(M_m*deltaS_m+M_b*deltaS_b);
res(jj, kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

```

```

        endfor

    endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefTampa_DefEmbebido_Matriz_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');
    for xii=1:1:xteta

        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid,'teta:%c%4.3f\n\\c:%c',csv,vteta(xii)*180/pi,csv);
        for xjj=1:1:xc
            fprintf(fid,'%4.3f%c',vc(xjj),csv);
        endfor
        fprintf(fid,'\n');

        for xkk=1:1:xa

            #imprime legendas dos eixos
            fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

            for xjj=1:1:xc
                if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido
                    fprintf(fid,'%c',csv);
                elseif
                    fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xjj,xkk,xii),csv);
                endif
            endfor

            fprintf(fid,'\n');
        endfor
        fprintf(fid,'\n\n');
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefTampa_DefEmbebido_DB_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'teta%cc%ca%cdeltaK\n',csv,csv,csv);

```



```

        for xii=1:1:xteta
            for xjj=1:1:xc
                for xkk=1:1:xa
                    if xres(xjj,xkk,xii)==xvalor_invalido

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi, csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv);
                    elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi, csv,vc(xjj),csv,va(xkk),csv,xre
s(xjj,xkk,xii));
                    endif
                endfor
            endfor
        endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

### A.1.6. Código da rotina do Conjunto A respectivo a um defeito superficial na tampa

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , de um defeito semi-elíptico superficial na tampa da caixa, com os parâmetros  $a$ ,  $c$  e  $\theta$  independentes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefTampa_DefSuperficial_ind_teta_c_a(a,c,B,W,teta,deltaS_m,deltaS_b)

res=zeros(length(c),length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        for jj=1:1:length(c)

            M=1;

            if 2*c(jj)/W<0.8
                f_w=(sec((pi*c(jj)/W)*(a(kk)/B)^0.5))^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c(jj))>=0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                fi=(1+1.464*(a(kk)/c(jj))^1.65)^0.5;
            elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
                fi=(1+1.464*(c(jj)/a(kk))^1.65)^0.5;
            else
                res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c(jj)+0.6))
            || (a(kk)/(2*c(jj))>0.1 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
                a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

                if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                    M_1=1.13-0.09*(a(kk)/c(jj));
                elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
                    M_1=(c(jj)/a(kk))^0.5*(1+0.04*(c(jj)/a(kk)));
                else
                    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
                    continue
                endif

                if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
                    M_2=(0.89/(0.2+(a(kk)/c(jj))))-0.54;
                elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
```

```

        M_2=0.2*(c(jj)/a(kk))^4;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        M_3=0.5-(1/(0.65+(a(kk)/c(jj))))+14*(1-(a(kk)/c(jj)))^24;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        M_3=-0.11*(c(jj)/a(kk))^4;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        g=1+(0.1+0.35*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        g=1+(0.1+0.35*(c(jj)/a(kk))*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
        f_teta=((a(kk)/c(jj))^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
    elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
        f_teta=((c(jj)/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
    else
        res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(a(kk)/B)^2+M_3*(a(kk)/B)^4)*(g*f_teta)/fi;

    if ((a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c(jj)+0.6))
    || (a(kk)/(2*c(jj))>0.1 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
        a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

        if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
            G_1=-1.22-0.12*(a(kk)/c(jj));
        elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
            G_1=-2.11+0.77*(c(jj)/a(kk));
        else
            res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
            G_2=0.55-1.05*(a(kk)/c(jj))^0.75+0.47*(a(kk)/c(jj))^1.5;

```

```

elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    G_2=0.55-0.72*(c(jj)/a(kk))^0.75+0.14*(c(jj)/a(kk))^1.5;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    q=0.2+(a(kk)/c(jj))+0.6*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    q=0.2+(c(jj)/a(kk))+0.6*(a(kk)/B);
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c(jj))>0 && a(kk)/(2*c(jj))<=0.5
    H_1=1-0.34*(a(kk)/B)-0.11*(a(kk)/c(jj))*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c(jj))>0.5 && a(kk)/(2*c(jj))<=1
    H_1=1-(0.04+0.41*(c(jj)/a(kk)))*(a(kk)/B)+(0.55-
1.93*(c(jj)/a(kk))^0.75+1.38*(c(jj)/a(kk))^1.5)*(a(kk)/B)^2;
else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

H_2=1+G_1*(a(kk)/B)+G_2*(a(kk)/B)^2;

H=H_1+(H_2-H_1)*sin(teta(ii))^q;

else
    res(jj, kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_b=H*M_m;

Y_deltaSigma=M*f_w*(M_m*deltaS_m+M_b*deltaS_b);
res(jj, kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(c),length(a),valor_invalido,teta,c,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xc,xa,xvalor_invalido,vteta,vc,va)

    csv=',';
    filename='deltaK_DefTampa_DefSuperficial_Matriz_ind_teta_c_a.csv';

```

```

fid=fopen(filename, 'w');
for xii=1:1:xteta

    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid, 'teta:%c%4.3f\n', c, vteta(xii)*180/pi, csv);
    for xjj=1:1:xc
        fprintf(fid, '%4.3f%c', vc(xjj), csv);
    endfor
    fprintf(fid, '\n');

    for xkk=1:1:xa

        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid, '%4.3f%c', va(xkk), csv);

        for xjj=1:1:xc
            if xres(xjj, xkk, xii) == xvalor_invalido
                fprintf(fid, '%c', csv);
            elseif
                fprintf(fid, '%4.3f%c', xres(xjj, xkk, xii), csv);
            endif
        endfor

        fprintf(fid, '\n');
    endfor
    fprintf(fid, '\n\n');
endfor
fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres, xteta, xc, xa, xvalor_invalido, vteta, vc, va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefTampa_DefSuperficial_DB_ind_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid, 'teta%cc%ca%cdeltaK\n', csv, csv, csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xjj=1:1:xc
            for xkk=1:1:xa
                if xres(xjj, xkk, xii) == xvalor_invalido

fprintf(fid, '%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c\n', vteta(xii)*180/pi, csv, vc(xjj), csv, va(xkk), csv);
                    elseif

fprintf(fid, '%4.3f%c%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n', vteta(xii)*180/pi, csv, vc(xjj), csv, va(xkk), csv, xres(xjj, xkk, xii));
                        endif
                    endfor
                endfor
            endfor
        endfor
    endfor
    fclose(fid);
endfunction

```

endfunction

## A.2. Códigos das rotinas do Conjunto B

### A.2.1. Código da rotina do Conjunto B respetivo ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto mais profundo de um defeito elíptico embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa, com o parâmetro  $c$  dependente de  $a$  e o parâmetro  $\theta$  independente destes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_DeepPoint_dep_teta_c_a(a,p,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS
_m,deltaS_b)

res=zeros(length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        c=4*a(kk);
        M=1;
        B_linha=2*a(kk)+2*p;

        if 2*c/W<0.8
            f_w=(sec((pi*c/W)*(2*a(kk)/B_linha)^0.5))^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if a(kk)/(2*c)>=0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
            fi=(1+1.464*(a(kk)/c)^1.65)^0.5;
        elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
            fi=(1+1.464*(c/a(kk))^1.65)^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1) &&
            ((a(kk)/B_linha)<0.625*((a(kk)/c)+0.6)) || ~(a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1)) ...
            && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/(2*c)>0 && (2*c)/W<0.5 && teta(ii)>=-pi &&
            teta(ii)<=pi

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_1=1;
            elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                M_1=(c/a(kk))^0.5;
            else
                res(kk, ii)=valor_invalido;
            end
        end
    end
end
```

```

        continue
    endif

    M_2=0.05/(0.11+(a(kk)/c)^1.5);
    M_3=0.29/(0.23+(a(kk)/c)^1.5);
    g=1-(((2*a(kk)/B_linha)^4*(2.6-
(4*a(kk)/B_linha))^0.5)/(1+4*(a(kk)/c)))*abs(cos(teta(ii)));

    if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
        f_teta=((a(kk)/c)^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
    elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
        f_teta=((c/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
    else
        res(kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(2*a(kk)/B_linha)^2+M_3*((2*a(kk))/B_linha)^4)*(g*f_teta)/fi;

if (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B<=0.1841)
    lambda_1=1.044;
    lambda_2=-2.44;
    lambda_3=0;
    lambda_4=-3.166;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
    elseif (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B>0.1841 &&
a(kk)/B<=0.125)
        lambda_1=0.94;
        lambda_2=-1.875;
        lambda_3=-0.1146;
        lambda_4=-1.844;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
    elseif (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B>0.1841 &&
a(kk)/B>0.125)
        lambda_1=1.06;
        lambda_2=-2.2;
        lambda_3=-0.6666;
        lambda_4=-0.6666;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
    elseif teta(ii)~=pi/2
        M_b=1;
    else
        res(kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

```

#Estas equacoes do M\_km e M\_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.



#Z\_1\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_1*((a/B_{linha})*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_2\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_2*(a/B)$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B_{linha})*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

if  $a(kk)/B > 0.005$  &&  $a(kk)/B < 0.9$  &&  $a(kk)/c \geq 0.1$  &&  $a(kk)/c \leq 1$  &&  $L/B \geq 0.5$  &&  $L/B \leq 2.75$

g\_1\_M\_km=-1.0343\*(a(kk)/c)^2-0.15657\*(a(kk)/c)+1.3409;

g\_2\_M\_km=1.3218\*(a(kk)/c)^-0.61153;

g\_3\_M\_km=-0.87238\*(a(kk)/c)+1.2788;

g\_4\_M\_km=-0.46190\*(a(kk)/c)^3+0.67090\*(a(kk)/c)^2-0.37571\*(a(kk)/c)+4.6511;

g\_5\_M\_km=-0.015647\*(L/B)^3+0.090889\*(L/B)^2-0.17180\*(L/B)-0.24587;

g\_6\_M\_km=-0.20136\*(L/B)^2+0.93311\*(L/B)-0.41496;

g\_7\_M\_km=0.20188\*(L/B)^2-0.97857\*(L/B)+0.068225;

g\_8\_M\_km=-0.027338\*(L/B)^2+0.12551\*(L/B)-11.218;

else

res(kk, ii)=valor\_invalido;

continue

endif

Z\_1\_M\_km=0.43358\*(a(kk)/B)^(g\_1\_M\_km+(g\_2\_M\_km\*(a(kk)/B))^g\_3\_M\_km)+0.93163\*exp((a(kk)/B)^-0.050966)+g\_4\_M\_km;

Z\_2\_M\_km=-0.21521\*(1-(a(kk)/B))^176.4199+2.8141\*(a(kk)/B)^(-0.10740\*(a(kk)/B));

Z\_3\_M\_km=0.33994\*(a(kk)/B)^g\_5\_M\_km+1.9493\*(a(kk)/B)^0.23003+(g\_6\_M\_km\*(a(kk)/B)^2+g\_7\_M\_km\*(a(kk)/B)+g\_8\_M\_km);

M\_km=Z\_1\_M\_km+Z\_2\_M\_km+Z\_3\_M\_km;

#Z\_1\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_1*((a/B_{linha})*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de flexao

#Z\_2\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_2*(a/B)$  apresentada na norma para as tensoes de flexao

#Z\_3\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B_{linha})*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de flexao

if  $a(kk)/B \geq 0.005$  &&  $a(kk)/B \leq 0.9$  &&  $a(kk)/c \geq 0.1$  &&  $a(kk)/c \leq 1$  &&  $L/B \geq 0.5$  &&  $L/B \leq 2.75$

g\_1\_M\_kb=-0.014992\*(a(kk)/c)^2-0.021401\*(a(kk)/c)-0.23851;

g\_2\_M\_kb=0.61775\*(a(kk)/c)^-1.0278;

g\_3\_M\_kb=0.00013242\*(a(kk)/c)-1.4744;

g\_4\_M\_kb=-0.28783\*(a(kk)/c)^3+0.58706\*(a(kk)/c)^2-0.37198\*(a(kk)/c)-0.89887;

g\_5\_M\_kb=-17.195\*(a(kk)/B)^2+12.468\*(a(kk)/B)-0.51662;

g\_6\_M\_kb=-0.059798\*(L/B)^3+0.38091\*(L/B)^2-0.8022037\*(L/B)+0.31906;

g\_7\_M\_kb=-0.35848\*(L/B)^2+1.3975\*(L/B)-1.7535;

g\_8\_M\_kb=0.31288\*(L/B)^2-1.3599\*(L/B)+1.6611;

g\_9\_M\_kb=-0.0014701\*(L/B)^2-0.0025074\*(L/B)-0.0089846;

else

```

        res(kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    Z_1_M_kb=0.065916*(a(kk)/B)^(g_1_M_kb+(g_2_M_kb*(a(kk)/B))^g_3_M_kb)+0.52086*exp((a(kk)/B)^-0.10364)+g_4_M_kb;
    Z_2_M_kb=-0.02195*(1-(a(kk)/B))^2.8086+0.021403*(a(kk)/B)^g_5_M_kb;
    Z_3_M_kb=0.23344*(a(kk)/B)^g_6_M_kb-0.14827*(a(kk)/B)^-0.20077+(g_7_M_kb*(a(kk)/B)^2+g_8_M_kb*(a(kk)/B)+g_9_M_kb);

    M_kb=Z_1_M_kb+Z_2_M_kb+Z_3_M_kb;

    Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_tb*M_kb*M_b*deltaS_b);
    res(kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_DeepPoint_Matriz_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid,'c=4*a\n');
    fprintf(fid,'a\\\\\\teta:%c',csv);

    for xii=1:1:xteta
        fprintf(fid,'%4.3f%c',vteta(xii)*180/pi,csv);
    endfor

    fprintf(fid,'\n');

    for xkk=1:1:xa
        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

        for xii=1:1:xteta

            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%c',csv);
            elseif
                fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xkk,xii),csv);
            endif

        endfor

    endfor

```

```

        fprintf(fid,'\n');
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_DeepPoint_DB_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'c=4*a\n');
    fprintf(fid,'teta%ca%cdeltaK\n',csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xkk=1:1:xa
            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv);
            elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv,xres(xkk,xii));
            endif
        endfor
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

### A.2.2. Código da rotina do Conjunto B respectivo ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto menos profundo de um defeito elíptico embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa, com o parâmetro  $c$  dependente de  $a$  e o parâmetro  $\theta$  independente destes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_SurfacePoint_dep_teta_c_a(a,p,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_m,deltaS_b)

    res=zeros(length(a),length(teta));
    valor_invalido=-9999;

    for ii=1:1:length(teta)

        for kk=1:1:length(a)

            c=4*a(kk);
            M=1;
            B_linha=2*a(kk)+2*p;

            if 2*c/W<0.8
                f_w=(sec((pi*c/W)*(2*a(kk)/B_linha)^0.5))^0.5;
            else
                res(kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c)>=0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                fi=(1+1.464*(a(kk)/c)^1.65)^0.5;
            elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                fi=(1+1.464*(c/a(kk))^1.65)^0.5;
            else
                res(kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1) &&
                ((a(kk)/B_linha)<0.625*((a(kk)/c)+0.6)) || ~(a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1)) ...
                && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/(2*c)>0 && (2*c)/W<0.5 && teta(ii)>=-pi &&
                teta(ii)<=pi

                if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                    M_1=1;
                elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                    M_1=(c/a(kk))^0.5;
                else
                    res(kk, ii)=valor_invalido;
                    continue
                endif
            end
        end
    end
```

```

M_2=0.05/(0.11+(a(kk)/c)^1.5);
M_3=0.29/(0.23+(a(kk)/c)^1.5);
g=1-(((2*a(kk)/B_linha)^4*(2.6-
(4*a(kk)/B_linha)^0.5)/(1+4*(a(kk)/c)))*abs(cos(teta(ii))));

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    f_teta=((a(kk)/c)^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    f_teta=((c/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(2*a(kk)/B_linha)^2+M_3*((2*a(kk))/B_linha)^4)*(g*f_teta)/fi;

if (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B<=0.1841)
    lambda_1=1.044;
    lambda_2=-2.44;
    lambda_3=0;
    lambda_4=-3.166;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B>0.1841 &&
a(kk)/B<=0.125)
    lambda_1=0.94;
    lambda_2=-1.875;
    lambda_3=-0.1146;
    lambda_4=-1.844;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B>0.1841 &&
a(kk)/B>0.125)
    lambda_1=1.06;
    lambda_2=-2.2;
    lambda_3=-0.6666;
    lambda_4=-0.6666;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif teta(ii)~=pi/2
    M_b=1;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

#Estas equacoes do M_km e M_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.

#Z_1_M_km corresponde a toda a expressao f_1*((a/B_linha)*(c/a)*(L/B))
apresentada na norma para as tensoes de membrana

```

#Z\_2\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_2*((a/B\_linha)*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_km corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B\_linha)*(a/c\_linha)*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

if  $a(kk)/B > 0.005$  &&  $a(kk)/B < 0.9$  &&  $a(kk)/c >= 0.1$  &&  $a(kk)/c <= 1$  &&  $L/B >= 0.5$  &&  $L/B <= 2.75$

```

g_1_M_km=0.0078157*(c/a(kk))^2-0.070664*(c/a(kk))+1.8508;
g_2_M_km=-0.000054546*(L/B)^2+0.00013651*(L/B)-0.00047844;
g_3_M_km=0.00049192*(L/B)^2-0.0013595*(L/B)+0.011400;
g_4_M_km=0.0071654*(L/B)^2-0.033399*(L/B)-0.25064;
g_5_M_km=-0.018640*(c/a(kk))^2+0.24311*(c/a(kk))-1.7644;
g_6_M_km=-0.0016713*(L/B)^2+0.0090620*(L/B)-0.016479;
g_7_M_km=-0.0031615*(L/B)^2-0.010944*(L/B)+0.13967;
g_8_M_km=-0.045206*(L/B)^3+0.32380*(L/B)^2-0.68935*(L/B)+1.4954;
g_9_M_km=-0.25473*(a(kk)/c)^2+0.40928*(a(kk)/c)+0.0021892;
g_10_M_km=37.423*(a(kk)/c)^2-15.741*(a(kk)/c)+64.903;
g_11_M_km=-0.10553*(L/B)^3+0.59894*(L/B)^2-1.0942*(L/B)-1.2650;
g_12_M_km=0.043891*(L/B)^3-0.24898*(L/B)^2+0.44732*(L/B)+0.60136;
g_13_M_km=-0.011411*(a(kk)/c)^2+0.0043695*(a(kk)/c)+0.51732;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

```

$Z_1\_M\_km = g_1\_M\_km * (a(kk)/B)^{(g_2\_M\_km * (c/a(kk))^2 + g_3\_M\_km * (c/a(kk)) + g_4\_M\_km + g_5\_M\_km * (1 - (a(kk)/B))^{(g_6\_M\_km * (c/a(kk))^2 + g_7\_M\_km * (c/a(kk)) + g_8\_M\_km)})}$   
 $Z_2\_M\_km = (-0.28639 * (a(kk)/c)^2 + 0.35411 * (a(kk)/c) + 1.6430) * (a(kk)/B)^{g_9\_M\_km} + 0.27449 * (1 - (a(kk)/B))^{g_{10\_M\_km}}$

$Z_3\_M\_km = g_{11\_M\_km} * (a(kk)/B)^{0.75429} + g_{12\_M\_km} * \exp((a(kk)/B)^{g_{13\_M\_km}})$

$M\_km = Z_1\_M\_km * Z_2\_M\_km * Z_3\_M\_km$

#Z\_1\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_1*((a/B\_linha)*(c/a)*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_2\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_2*((a/B\_linha)*(a/c))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_kb corresponde a toda a expressao  $f_3*((a/B\_linha)*(a/c\_linha)*(L/B))$  apresentada na norma para as tensoes de membrana

if  $a(kk)/B >= 0.005$  &&  $a(kk)/B <= 0.9$  &&  $a(kk)/c >= 0.1$  &&  $a(kk)/c <= 1$  &&  $L/B >= 0.5$  &&  $L/B <= 2.75$

```

g_1_M_kb=0.0023232*(c/a(kk))^2-0.00037156*(c/a(kk))+4.5985;
g_2_M_kb=-0.000044010*(L/B)^2+0.00014425*(L/B)-0.00086706;
g_3_M_kb=0.00039951*(L/B)^2-0.0013715*(L/B)+0.014251;
g_4_M_kb=0.0046169*(L/B)^2-0.017917*(L/B)-0.16335;
g_5_M_kb=-0.018524*(c/a(kk))^2+0.27810*(c/a(kk))-5.4253;
g_6_M_kb=-0.00037981*(L/B)^2+0.0025078*(L/B)+0.00014693;
g_7_M_kb=-0.0038508*(L/B)^2+0.0023212*(L/B)-0.026862;
g_8_M_kb=-0.011911*(L/B)^3+0.082625*(L/B)^2-0.16086*(L/B)+1.2302;
g_9_M_kb=0.27798*(a(kk)/B)^3-1.2144*(a(kk)/B)^2-
2.4680*(a(kk)/B)+0.099981;

```

```

g_10_M_kb=-0.25922*(a(kk)/c)^2+0.39566*(a(kk)/c)+0.011759;
g_11_M_kb=6.5974*(a(kk)/c)^2+55.787*(a(kk)/c)+37.053;
g_12_M_kb=-0.14895*(L/B)^3+0.81526*(L/B)^2-1.4795*(L/B)-0.89808;
g_13_M_kb=0.055459*(L/B)^3-0.30180*(L/B)^2+0.54154*(L/B)+0.53433;
g_14_M_kb=-0.01343*(a(kk)/c)^2+0.0066702*(a(kk)/c)+0.75939;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

Z_1_M_kb=g_1_M_kb*(a(kk)/B)^(g_2_M_kb*(c/a(kk))^2+g_3_M_kb*(c/a(kk))+g_4_M_kb)+
g_5_M_kb*(1-
(a(kk)/B))^(g_6_M_kb*(c/a(kk))^2+g_7_M_kb*(c/a(kk))+g_8_M_kb)+g_9_M_kb;
Z_2_M_kb=(-
0.35006*(a(kk)/c)^2+0.40768*(a(kk)/c)+1.7053)*(a(kk)/B)^g_10_M_kb+0.24988*(1-
(a(kk)/B))^g_11_M_kb;

Z_3_M_kb=g_12_M_kb*(a(kk)/B)^0.94761+g_13_M_kb*exp((a(kk)/B)^g_14_M_kb);

M_kb=Z_1_M_kb*Z_2_M_kb*Z_3_M_kb;

Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_tb*M_kb*M_b*deltaS_b);
res(kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

csv='';
filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_SurfacePoint_Matriz_dep_teta_c_a.csv';
fid=fopen(filename, 'w');

#imprime legendas dos eixos
fprintf(fid,'c=4*a\n');
fprintf(fid,'a\\\\\\teta:%c',csv);

for xii=1:1:xteta
    fprintf(fid,'%4.3f%c',vteta(xii)*180/pi,csv);
endfor

fprintf(fid,'\n');

for xkk=1:1:xa
    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

```

```

for xii=1:1:xteta

    if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
        fprintf(fid,'%c',csv);
    elseif
        fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xkk,xii),csv);
    endif

endfor
fprintf(fid,'\n');
endfor
fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefEmbebido_SurfacePoint_DB_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'c=4*a\n');
    fprintf(fid,'teta%ca%cdeltaK\n',csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xkk=1:1:xa
            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv);
            elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv,xres(xkk,xii));
            endif
        endfor
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

```



### A.2.3. Código da rotina do Conjunto B respectivo ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto mais profundo de um defeito semi-elíptico superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa, com o parâmetro  $c$  dependente de  $a$  e o parâmetro  $\theta$  independente destes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_DeepPoint_dep_teta_c_a(a,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_
m,deltaS_b)

res=zeros(length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        c=2*a(kk);
        M=1;

        if 2*c/W<0.8
            f_w=(sec((pi*c/W)*(a(kk)/B)^0.5))^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if a(kk)/(2*c)>=0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
            fi=(1+1.464*(a(kk)/c)^1.65)^0.5;
        elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
            fi=(1+1.464*(c/a(kk))^1.65)^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c+0.6)) ||
(a(kk)/(2*c)>0.1 && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_1=1.13-0.09*(a(kk)/c);
            elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                M_1=(c/a(kk))^0.5*(1+0.04*(c/a(kk)));
            else
                res(kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_2=(0.89/(0.2+(a(kk)/c)))-0.54;
```

```

elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    M_2=0.2*(c/a(kk))^4;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    M_3=0.5-(1/(0.65+(a(kk)/c)))+14*(1-(a(kk)/c))^24;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    M_3=-0.11*(c/a(kk))^4;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    g=1+(0.1+0.35*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    g=1+(0.1+0.35*(c/a(kk))*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    f_teta=((a(kk)/c)^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    f_teta=((c/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(a(kk)/B)^2+M_3*(a(kk)/B)^4)*(g*f_teta)/fi;

if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c+0.6)) ||
(a(kk)/(2*c)>0.1 && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    G_1=-1.22-0.12*(a(kk)/c);
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    G_1=-2.11+0.77*(c/a(kk));
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5

```

```

    G_2=0.55-1.05*(a(kk)/c)^0.75+0.47*(a(kk)/c)^1.5;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    G_2=0.55-0.72*(c/a(kk))^0.75+0.14*(c/a(kk))^1.5;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    q=0.2+(a(kk)/c)+0.6*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    q=0.2+(c/a(kk))+0.6*(a(kk)/B);
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    H_1=1-0.34*(a(kk)/B)-0.11*(a(kk)/c)*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    H_1=1-(0.04+0.41*(c/a(kk)))*(a(kk)/B)+(0.55-
1.93*(c/a(kk))^0.75+1.38*(c/a(kk))^1.5)*(a(kk)/B)^2;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

H_2=1+G_1*(a(kk)/B)+G_2*(a(kk)/B)^2;

H=H_1+(H_2-H_1)*sin(teta(ii))^q;

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_b=H*M_m;

#Estas equacoes do M_km e M_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.

#Z_1_M_km corresponde a toda a expressao f_1*((a/B_linha)*(a/c)) apresentada na
norma para as tensoes de membrana
#Z_2_M_km corresponde a toda a expressao f_2*(a/B) apresentada na norma para as
tensoes de membrana
#Z_3_M_km corresponde a toda a expressao f_3*((a/B_linha)*(L/B)) apresentada na
norma para as tensoes de membrana

if a(kk)/B>0.005 && a(kk)/B<0.9 && a(kk)/c>=0.1 && a(kk)/c<=1 && L/B>=0.5
&& L/B<=2.75
    g_1_M_km=-1.0343*(a(kk)/c)^2-0.15657*(a(kk)/c)+1.3409;
    g_2_M_km=1.3218*(a(kk)/c)^-0.61153;
    g_3_M_km=-0.87238*(a(kk)/c)+1.2788;
    g_4_M_km=-0.46190*(a(kk)/c)^3+0.67090*(a(kk)/c)^2-
0.37571*(a(kk)/c)+4.6511;
    g_5_M_km=-0.015647*(L/B)^3+0.090889*(L/B)^2-0.17180*(L/B)-0.24587;

```

```

g_6_M_km=-0.20136*(L/B)^2+0.93311*(L/B)-0.41496;
g_7_M_km=0.20188*(L/B)^2-0.97857*(L/B)+0.068225;
g_8_M_km=-0.027338*(L/B)^2+0.12551*(L/B)-11.218;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

Z_1_M_km=0.43358*(a(kk)/B)^(g_1_M_km+(g_2_M_km*(a(kk)/B))^g_3_M_km)+0.93163*exp((a(kk)/B)^-0.050966)+g_4_M_km;
Z_2_M_km=-0.21521*(1-(a(kk)/B))^176.4199+2.8141*(a(kk)/B)^(-0.10740*(a(kk)/B));

Z_3_M_km=0.33994*(a(kk)/B)^g_5_M_km+1.9493*(a(kk)/B)^0.23003+(g_6_M_km*(a(kk)/B)^2+g_7_M_km*(a(kk)/B)+g_8_M_km);

M_km=Z_1_M_km+Z_2_M_km+Z_3_M_km;

#Z_1_M_kb corresponde a toda a expressao f_1*((a/B_linha)*(a/c)) apresentada na norma para as tensoes de flexao
#Z_2_M_kb corresponde a toda a expressao f_2*(a/B) apresentada na norma para as tensoes de flexao
#Z_3_M_kb corresponde a toda a expressao f_3*((a/B_linha)*(L/B)) apresentada na norma para as tensoes de flexao

if a(kk)/B>=0.005 && a(kk)/B<=0.9 && a(kk)/c>=0.1 && a(kk)/c<=1 && L/B>=0.5 && L/B<=2.75
    g_1_M_kb=-0.014992*(a(kk)/c)^2-0.021401*(a(kk)/c)-0.23851;
    g_2_M_kb=0.61775*(a(kk)/c)^-1.0278;
    g_3_M_kb=0.00013242*(a(kk)/c)-1.4744;
    g_4_M_kb=-0.28783*(a(kk)/c)^3+0.58706*(a(kk)/c)^2-0.37198*(a(kk)/c)-0.89887;
    g_5_M_kb=-17.195*(a(kk)/B)^2+12.468*(a(kk)/B)-0.51662;
    g_6_M_kb=-0.059798*(L/B)^3+0.38091*(L/B)^2-0.8022037*(L/B)+0.31906;
    g_7_M_kb=-0.35848*(L/B)^2+1.3975*(L/B)-1.7535;
    g_8_M_kb=0.31288*(L/B)^2-1.3599*(L/B)+1.6611;
    g_9_M_kb=-0.0014701*(L/B)^2-0.0025074*(L/B)-0.0089846;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

Z_1_M_kb=0.065916*(a(kk)/B)^(g_1_M_kb+(g_2_M_kb*(a(kk)/B))^g_3_M_kb)+0.52086*exp((a(kk)/B)^-0.10364)+g_4_M_kb;
Z_2_M_kb=-0.02195*(1-(a(kk)/B))^2.8086+0.021403*(a(kk)/B)^g_5_M_kb;
Z_3_M_kb=0.23344*(a(kk)/B)^g_6_M_kb-0.14827*(a(kk)/B)^-0.20077+(g_7_M_kb*(a(kk)/B)^2+g_8_M_kb*(a(kk)/B)+g_9_M_kb);

M_kb=Z_1_M_kb+Z_2_M_kb+Z_3_M_kb;

Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_tb*M_kb*M_b*deltaS_b);
res(kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

```

```

        endfor

    endfor

    fprintf(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)
    fprintfDB(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_DeepPoint_Matriz_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid,'c=2*a\n');
    fprintf(fid,'a\\\\\\teta:%c',csv);

    for xii=1:1:xteta
        fprintf(fid,'%4.3f%c',vteta(xii)*180/pi,csv);
    endfor

    fprintf(fid,'\n');

    for xkk=1:1:xa
        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

        for xii=1:1:xteta

            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%c',csv);
            elseif
                fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xkk,xii),csv);
            endif

        endfor
        fprintf(fid,'\n');
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_DeepPoint_DB_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'c=2*a\n');
    fprintf(fid,'teta%ca%cdeltaK\n',csv,csv);

```

```

for xii=1:1:xteta
    for xkk=1:1:xa
        if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
            fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi, csv, va(xkk), csv);
        elseif
            fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi, csv, va(xkk), csv, xres(xkk,xii));
        endif
    endfor
endfor
fclose(fid);

endfunction

```

#### A.2.4. Código da rotina do Conjunto B respectivo ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , no ponto menos profundo de um defeito semi-elíptico superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo da caixa, com o parâmetro  $c$  dependente de  $a$  e o parâmetro  $\theta$  independente destes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_SurfacePoint_dep_teta_c_a(a,B,W,teta,L,k_tm,k_tb,deltaS_
m,deltaS_b)

res=zeros(length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        c=2*a(kk);
        M=1;

        if 2*c/W<0.8
            f_w=(sec((pi*c/W)*(a(kk)/B)^0.5))^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if a(kk)/(2*c)>=0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
            fi=(1+1.464*(a(kk)/c)^1.65)^0.5;
        elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
            fi=(1+1.464*(c/a(kk))^1.65)^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c+0.6)) ||
(a(kk)/(2*c)>0.1 && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_1=1.13-0.09*(a(kk)/c);
            elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                M_1=(c/a(kk))^0.5*(1+0.04*(c/a(kk)));
            else
                res(kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_2=(0.89/(0.2+(a(kk)/c)))-0.54;
```

```

elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    M_2=0.2*(c/a(kk))^4;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    M_3=0.5-(1/(0.65+(a(kk)/c)))+14*(1-(a(kk)/c))^24;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    M_3=-0.11*(c/a(kk))^4;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    g=1+(0.1+0.35*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    g=1+(0.1+0.35*(c/a(kk))*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    f_teta=((a(kk)/c)^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    f_teta=((c/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(a(kk)/B)^2+M_3*(a(kk)/B)^4)*(g*f_teta)/fi;

if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c+0.6)) ||
(a(kk)/(2*c)>0.1 && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    G_1=-1.22-0.12*(a(kk)/c);
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    G_1=-2.11+0.77*(c/a(kk));
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5

```



```

    G_2=0.55-1.05*(a(kk)/c)^0.75+0.47*(a(kk)/c)^1.5;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    G_2=0.55-0.72*(c/a(kk))^0.75+0.14*(c/a(kk))^1.5;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    q=0.2+(a(kk)/c)+0.6*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    q=0.2+(c/a(kk))+0.6*(a(kk)/B);
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    H_1=1-0.34*(a(kk)/B)-0.11*(a(kk)/c)*(a(kk)/B);
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    H_1=1-(0.04+0.41*(c/a(kk)))*(a(kk)/B)+(0.55-
1.93*(c/a(kk))^0.75+1.38*(c/a(kk))^1.5)*(a(kk)/B)^2;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

H_2=1+G_1*(a(kk)/B)+G_2*(a(kk)/B)^2;

H=H_1+(H_2-H_1)*sin(teta(ii))^q;

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_b=H*M_m;

#Estas equacoes do M_km e M_kb dizem respeito ao ponto mais fundo.

#Z_1_M_km corresponde a toda a expressao f_1*((a/B_linha)*(c/a)*(L/B))
apresentada na norma para as tensoes de membrana
#Z_2_M_km corresponde a toda a expressao f_2*((a/B_linha)*(a/c)) apresentada na
norma para as tensoes de membrana
#Z_3_M_km corresponde a toda a expressao f_3*((a/B_linha)*(a/c_linha)*(L/B))
apresentada na norma para as tensoes de membrana

if a(kk)/B>0.005 && a(kk)/B<0.9 && a(kk)/c>=0.1 && a(kk)/c<=1 && L/B>=0.5
&& L/B<=2.75
    g_1_M_km=0.0078157*(c/a(kk))^2-0.070664*(c/a(kk))+1.8508;
    g_2_M_km=-0.000054546*(L/B)^2+0.00013651*(L/B)-0.00047844;
    g_3_M_km=0.00049192*(L/B)^2-0.0013595*(L/B)+0.011400;
    g_4_M_km=0.0071654*(L/B)^2-0.033399*(L/B)-0.25064;
    g_5_M_km=-0.018640*(c/a(kk))^2+0.24311*(c/a(kk))-1.7644;
    g_6_M_km=-0.0016713*(L/B)^2+0.0090620*(L/B)-0.016479;

```

```

g_7_M_km=-0.0031615*(L/B)^2-0.010944*(L/B)+0.13967;
g_8_M_km=-0.045206*(L/B)^3+0.32380*(L/B)^2-0.68935*(L/B)+1.4954;
g_9_M_km=-0.25473*(a(kk)/c)^2+0.40928*(a(kk)/c)+0.0021892;
g_10_M_km=37.423*(a(kk)/c)^2-15.741*(a(kk)/c)+64.903;
g_11_M_km=-0.10553*(L/B)^3+0.59894*(L/B)^2-1.0942*(L/B)-1.2650;
g_12_M_km=0.043891*(L/B)^3-0.24898*(L/B)^2+0.44732*(L/B)+0.60136;
g_13_M_km=-0.011411*(a(kk)/c)^2+0.0043695*(a(kk)/c)+0.51732;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

```

```

Z_1_M_km=g_1_M_km*(a(kk)/B)^((g_2_M_km*(c/a(kk))^2+g_3_M_km*(c/a(kk))+g_4_M_
km)+g_5_M_km*(1-(a(kk)/B))^(g_6_M_km*(c/a(kk))^2+g_7_M_km*(c/a(kk))+g_8_M_
km);
Z_2_M_km=(-
0.28639*(a(kk)/c)^2+0.35411*(a(kk)/c)+1.6430)*(a(kk)/B)^g_9_M_km+0.27449*(1-
(a(kk)/B))^g_10_M_km;

```

```

Z_3_M_km=g_11_M_km*(a(kk)/B)^0.75429+g_12_M_km*exp((a(kk)/B)^g_13_M_km);

```

```

M_km=Z_1_M_km*Z_2_M_km*Z_3_M_km;

```

#Z\_1\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_1\*((a/B\_linha)\*(c/a)\*(L/B))  
apresentada na norma para as tensoes de membrana

#Z\_2\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_2\*((a/B\_linha)\*(a/c)) apresentada na  
norma para as tensoes de membrana

#Z\_3\_M\_kb corresponde a toda a expressao f\_3\*((a/B\_linha)\*(a/c\_linha)\*(L/B))  
apresentada na norma para as tensoes de membrana

```

if a(kk)/B>=0.005 && a(kk)/B<=0.9 && a(kk)/c>=0.1 && a(kk)/c<=1 &&
L/B>=0.5 && L/B<=2.75

```

```

g_1_M_kb=0.0023232*(c/a(kk))^2-0.00037156*(c/a(kk))+4.5985;
g_2_M_kb=-0.000044010*(L/B)^2+0.00014425*(L/B)-0.00086706;
g_3_M_kb=0.00039951*(L/B)^2-0.0013715*(L/B)+0.014251;
g_4_M_kb=0.0046169*(L/B)^2-0.017917*(L/B)-0.16335;
g_5_M_kb=-0.018524*(c/a(kk))^2+0.27810*(c/a(kk))-5.4253;
g_6_M_kb=-0.00037981*(L/B)^2+0.0025078*(L/B)+0.00014693;
g_7_M_kb=-0.0038508*(L/B)^2+0.0023212*(L/B)-0.026862;
g_8_M_kb=-0.011911*(L/B)^3+0.082625*(L/B)^2-0.16086*(L/B)+1.2302;
g_9_M_kb=0.27798*(a(kk)/B)^3-1.2144*(a(kk)/B)^2-2.4680*(a(kk)/B)+0.099981;
g_10_M_kb=-0.25922*(a(kk)/c)^2+0.39566*(a(kk)/c)+0.011759;
g_11_M_kb=6.5974*(a(kk)/c)^2+55.787*(a(kk)/c)+37.053;
g_12_M_kb=-0.14895*(L/B)^3+0.81526*(L/B)^2-1.4795*(L/B)-0.89808;
g_13_M_kb=0.055459*(L/B)^3-0.30180*(L/B)^2+0.54154*(L/B)+0.53433;
g_14_M_kb=-0.01343*(a(kk)/c)^2+0.0066702*(a(kk)/c)+0.75939;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

```

```

Z_1_M_kb=g_1_M_kb*(a(kk)/B)^(g_2_M_kb*(c/a(kk))^2+g_3_M_kb*(c/a(kk))+g_4_M_kb)+
g_5_M_kb*(1-
(a(kk)/B))^(g_6_M_kb*(c/a(kk))^2+g_7_M_kb*(c/a(kk))+g_8_M_kb)+g_9_M_kb;

```

```

        Z_2_M_kb=(-
0.35006*(a(kk)/c)^2+0.40768*(a(kk)/c)+1.7053)*(a(kk)/B)^g_10_M_kb+0.24988*(1-
(a(kk)/B))^g_11_M_kb;

Z_3_M_kb=g_12_M_kb*(a(kk)/B)^0.94761+g_13_M_kb*exp((a(kk)/B)^g_14_M_kb);

M_kb=Z_1_M_kb*Z_2_M_kb*Z_3_M_kb;

Y_deltaSigma=M*f_w*(k_tm*M_km*M_m*deltaS_m+k_tb*M_kb*M_b*deltaS_b);
res(kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

csv=',';
filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_SurfacePoint_Matriz_dep_teta_c_a.csv';
fid=fopen(filename, 'w');

#imprime legendas dos eixos
fprintf(fid,'c=2*a\n');
fprintf(fid,'a\\\\teta:%c',csv);

for xii=1:1:xteta
    fprintf(fid,'%4.3f%c',vteta(xii)*180/pi,csv);
endfor

fprintf(fid,'\n');

for xkk=1:1:xa
    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

    for xii=1:1:xteta

        if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
            fprintf(fid,'%c',csv);
        elseif
            fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xkk,xii),csv);
        endif

    endfor
    fprintf(fid,'\n');
endfor
fclose(fid);

endfunction

```

```

function fprintfDB(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefCorpo_DefSuperficial_SurfacePoint_DB_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'c=2*a\n');
    fprintf(fid,'teta%ca%cdeltaK\n',csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xkk=1:1:xa
            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv);
            elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv,xres(xkk,xii));
            endif
        endfor
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

### A.2.5. Código da rotina do Conjunto B respetivo a um defeito embebido na tampa

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , de um defeito elíptico embebido na tampa da caixa, com o parâmetro  $c$  dependente de  $a$  e o parâmetro  $\theta$  independente destes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefTampa_DefEmbebido_dep_teta_c_a(a,p,B,W,teta,deltaS_m,deltaS_b)

res=zeros(length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        c=4*a(kk);
        M=1;
        B_linha=2*a(kk)+2*p;

        if 2*c/W<0.8
            f_w=(sec((pi*c/W)*(2*a(kk)/B_linha)^0.5))^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if a(kk)/(2*c)>=0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
            fi=(1+1.464*(a(kk)/c)^1.65)^0.5;
        elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
            fi=(1+1.464*(c/a(kk))^1.65)^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1) &&
            ((a(kk)/B_linha)<0.625*((a(kk)/c)+0.6)) || ~(a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1)) ...
            && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/(2*c)>0 && (2*c)/W<0.5 && teta(ii)>=-pi &&
            teta(ii)<=pi

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_1=1;
            elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                M_1=(c/a(kk))^0.5;
            else
                res(kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            M_2=0.05/(0.11+(a(kk)/c)^1.5);
            M_3=0.29/(0.23+(a(kk)/c)^1.5);
```

```

g=1-(((2*a(kk)/B_linha)^4*(2.6-
(4*a(kk)/B_linha)^0.5)/(1+4*(a(kk)/c)))*abs(cos(teta(ii)));

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    f_teta=((a(kk)/c)^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    f_teta=((c/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(2*a(kk)/B_linha)^2+M_3*((2*a(kk))/B_linha)^4)*(g*f_teta)/fi;

if (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B<=0.1841)
    lambda_1=1.044;
    lambda_2=-2.44;
    lambda_3=0;
    lambda_4=-3.166;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B>0.1841 &&
a(kk)/B<=0.125)
    lambda_1=0.94;
    lambda_2=-1.875;
    lambda_3=-0.1146;
    lambda_4=-1.844;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif (a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5 && teta(ii)==pi/2) && (p/B>0.1841 &&
a(kk)/B>0.125)
    lambda_1=1.06;
    lambda_2=-2.2;
    lambda_3=-0.6666;
    lambda_4=-0.6666;

M_b=(lambda_1+lambda_2*(p/B)+lambda_3*(a(kk)/B)+lambda_4*(p*a(kk)/(B^2)))/fi;
elseif teta(ii)~=pi/2
    M_b=1;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

Y_deltaSigma=M*f_w*(M_m*deltaS_m+M_b*deltaS_b);
res(kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

```

```

fprintres(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)
fprintDB(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)

endfunction

function fprintres(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv=',';
    filename='deltaK_DefTampa_DefEmbebido_Matriz_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid,'c=4*a\n');
    fprintf(fid,'a\\\\\\teta:%c',csv);

    for xii=1:1:xteta
        fprintf(fid,'%4.3f%c',vteta(xii)*180/pi,csv);
    endfor

    fprintf(fid,'\n');

    for xkk=1:1:xa
        #imprime legendas dos eixos
        fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

        for xii=1:1:xteta

            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%c',csv);
            elseif
                fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xkk,xii),csv);
            endif

        endfor
        fprintf(fid,'\n');
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

function fprintDB(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv=',';
    filename='deltaK_DefTampa_DefEmbebido_DB_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'c=4*a\n');
    fprintf(fid,'teta%ca%cdeltaK\n',csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xkk=1:1:xa
            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv);
            end
        end
    end
end

```

```

elseif
fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi, csv, va(xkk), csv, xres(xkk, xii));
endif
endfor
endfor
fclose(fid);

endfunction

```



### A.2.6. Código da rotina do Conjunto B respetivo a um defeito superficial na tampa

Neste anexo encontra-se a rotina para determinação das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , de um defeito semi-elíptico superficial na tampa da caixa, com o parâmetro  $c$  dependente de  $a$  e o parâmetro  $\theta$  independente destes, baseado na norma BS 7910 [2]:

```
function
deltaK_DefTampa_DefSuperficial_dep_teta_c_a(a,B,W,teta,deltaS_m,deltaS_b)

res=zeros(length(a),length(teta));
valor_invalido=-9999;

for ii=1:1:length(teta)

    for kk=1:1:length(a)

        c=2*a(kk);
        M=1;

        if 2*c/W<0.8
            f_w=(sec((pi*c/W)*(a(kk)/B)^0.5))^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if a(kk)/(2*c)>=0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
            fi=(1+1.464*(a(kk)/c)^1.65)^0.5;
        elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
            fi=(1+1.464*(c/a(kk))^1.65)^0.5;
        else
            res(kk, ii)=valor_invalido;
            continue
        endif

        if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c+0.6)) ||
            (a(kk)/(2*c)>0.1 && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
            a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_1=1.13-0.09*(a(kk)/c);
            elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                M_1=(c/a(kk))^0.5*(1+0.04*(c/a(kk)));
            else
                res(kk, ii)=valor_invalido;
                continue
            endif

            if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
                M_2=(0.89/(0.2+(a(kk)/c)))-0.54;
            elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
                M_2=0.2*(c/a(kk))^4;
```

```

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    M_3=0.5-(1/(0.65+(a(kk)/c)))+14*(1-(a(kk)/c))^24;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    M_3=-0.11*(c/a(kk))^4;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    g=1+(0.1+0.35*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    g=1+(0.1+0.35*(c/a(kk))*(a(kk)/B)^2)*(1-sin(teta(ii)))^2;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    f_teta=((a(kk)/c)^2*cos(teta(ii))^2+sin(teta(ii))^2)^0.25;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    f_teta=((c/a(kk))^2*sin(teta(ii))^2+cos(teta(ii))^2)^0.25;
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_m=(M_1+M_2*(a(kk)/B)^2+M_3*(a(kk)/B)^4)*(g*f_teta)/fi;

if ((a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.1 && a(kk)/B<1.25*(a(kk)/c+0.6)) ||
(a(kk)/(2*c)>0.1 && a(kk)/(2*c)<=1 && a(kk)/B<1)) && ...
a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=1 && teta(ii)<=pi && teta(ii)>=0

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    G_1=-1.22-0.12*(a(kk)/c);
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
    G_1=-2.11+0.77*(c/a(kk));
else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
    G_2=0.55-1.05*(a(kk)/c)^0.75+0.47*(a(kk)/c)^1.5;
elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1

```

```

        G_2=0.55-0.72*(c/a(kk))^0.75+0.14*(c/a(kk))^1.5;
    else
        res(kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
        q=0.2+(a(kk)/c)+0.6*(a(kk)/B);
    elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
        q=0.2+(c/a(kk))+0.6*(a(kk)/B);
    else
        res(kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    if a(kk)/(2*c)>0 && a(kk)/(2*c)<=0.5
        H_1=1-0.34*(a(kk)/B)-0.11*(a(kk)/c)*(a(kk)/B);
    elseif a(kk)/(2*c)>0.5 && a(kk)/(2*c)<=1
        H_1=1-(0.04+0.41*(c/a(kk)))*(a(kk)/B)+(0.55-
1.93*(c/a(kk))^0.75+1.38*(c/a(kk))^1.5)*(a(kk)/B)^2;
    else
        res(kk, ii)=valor_invalido;
        continue
    endif

    H_2=1+G_1*(a(kk)/B)+G_2*(a(kk)/B)^2;

    H=H_1+(H_2-H_1)*sin(teta(ii))^q;

else
    res(kk, ii)=valor_invalido;
    continue
endif

M_b=H*M_m;

Y_deltaSigma=M*f_w*(M_m*deltaS_m+M_b*deltaS_b);
res(kk, ii)=Y_deltaSigma*sqrt(pi*a(kk));

endfor

endfor

fprintf(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)
fprintfDB(res,length(teta),length(a),valor_invalido,teta,a)

endfunction

function fprintfres(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefTampa_DefSuperficial_Matriz_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime legendas dos eixos

```

```

fprintf(fid,'c=2*a\n');
fprintf(fid,'a\\\\teta:%c',csv);

for xii=1:1:xteta
    fprintf(fid,'%4.3f%c',vteta(xii)*180/pi,csv);
endfor

fprintf(fid,'\n');

for xkk=1:1:xa
    #imprime legendas dos eixos
    fprintf(fid,'%4.3f%c',va(xkk),csv);

    for xii=1:1:xteta

        if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
            fprintf(fid,'%c',csv);
        elseif
            fprintf(fid,'%4.3f%c',xres(xkk,xii),csv);
        endif

    endfor
    fprintf(fid,'\n');
endfor
fclose(fid);

endfunction

function fprintfDB(xres,xteta,xa,xvalor_invalido,vteta,va)

    csv='';
    filename='deltaK_DefTampa_DefSuperficial_DB_dep_teta_c_a.csv';
    fid=fopen(filename, 'w');

    #imprime cabecalho
    fprintf(fid,'c=2*a\n');
    fprintf(fid,'teta%ca%cdeltaK\n',csv,csv);

    for xii=1:1:xteta
        for xkk=1:1:xa
            if xres(xkk,xii)==xvalor_invalido
                fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv);
            elseif

fprintf(fid,'%4.3f%c%4.3f%c%4.3f\n',vteta(xii)*180/pi,csv,va(xkk),csv,xres(xkk,xii));
            endif
        endfor
    endfor
    fclose(fid);

endfunction

```

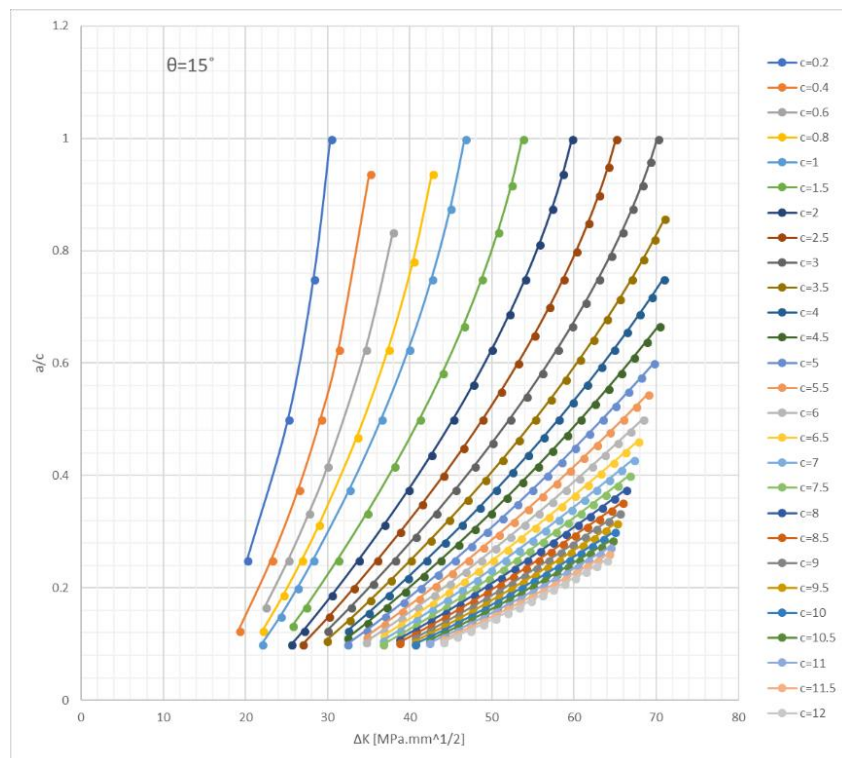


## Anexo B - Gráficos dos Resultados

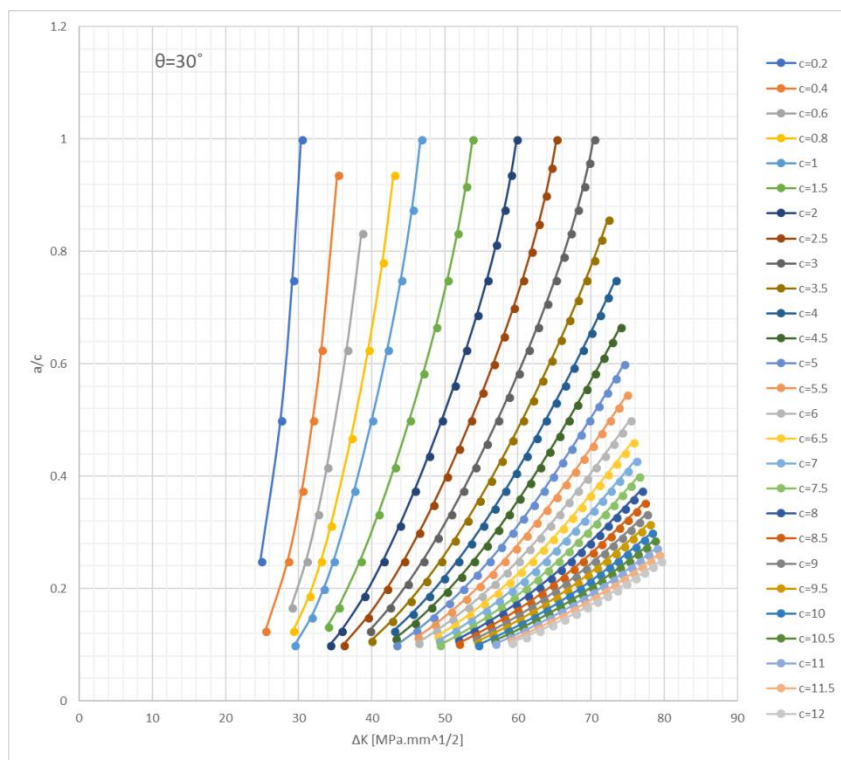
### B.1. Resultados das rotinas do Conjunto A

#### B.1.1. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

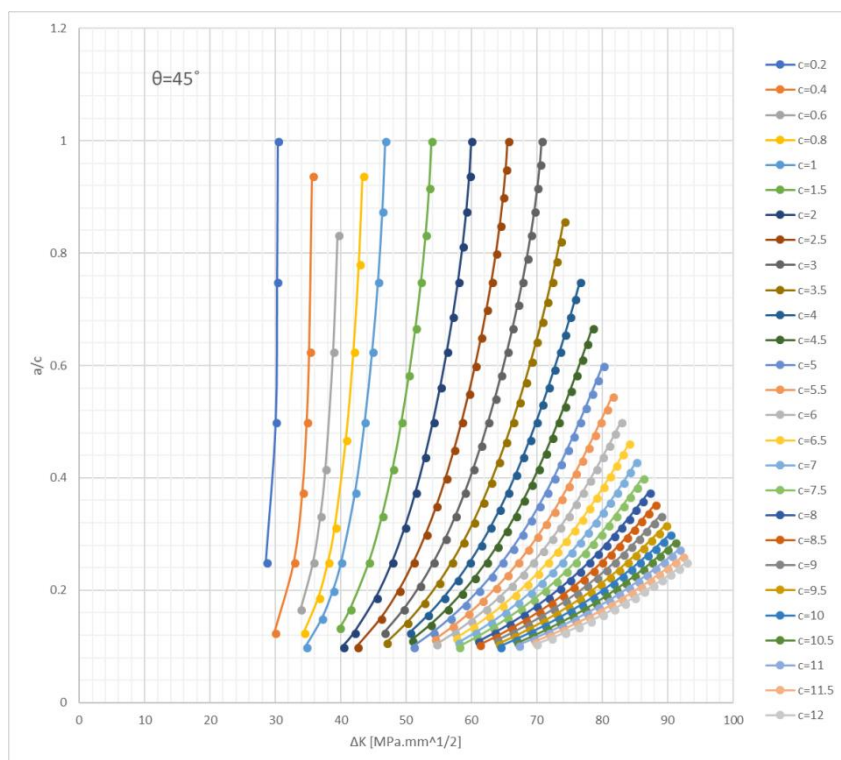
Neste anexo apresentam-se os gráficos representativos da evolução das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , com a relação de parâmetros  $a/c$ , para  $\theta$  igual a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , em (a), (b), (c), (d) e (e), respetivamente, correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito elíptico embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.



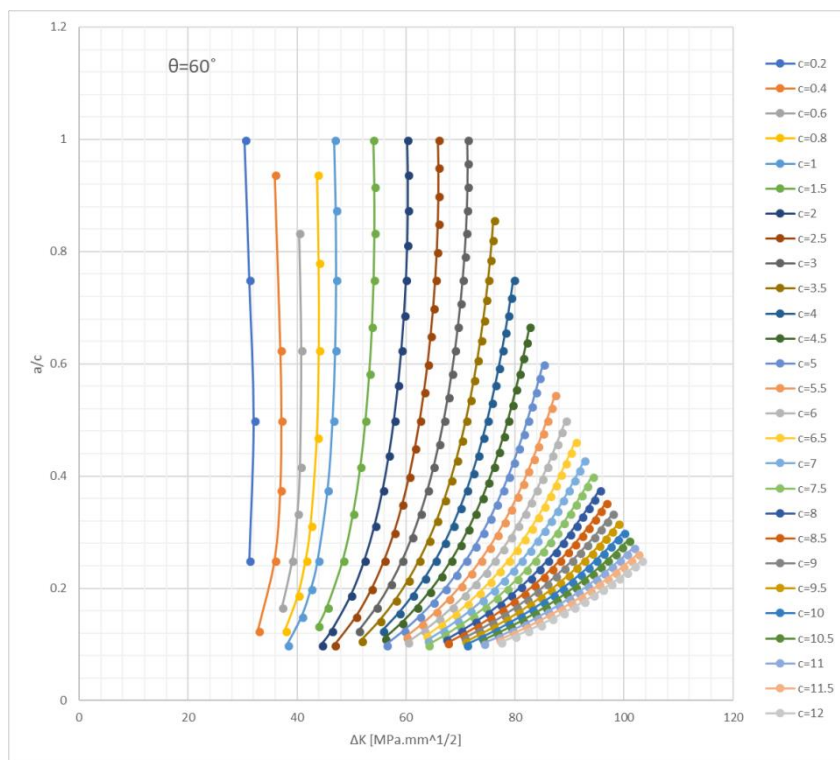
(a)



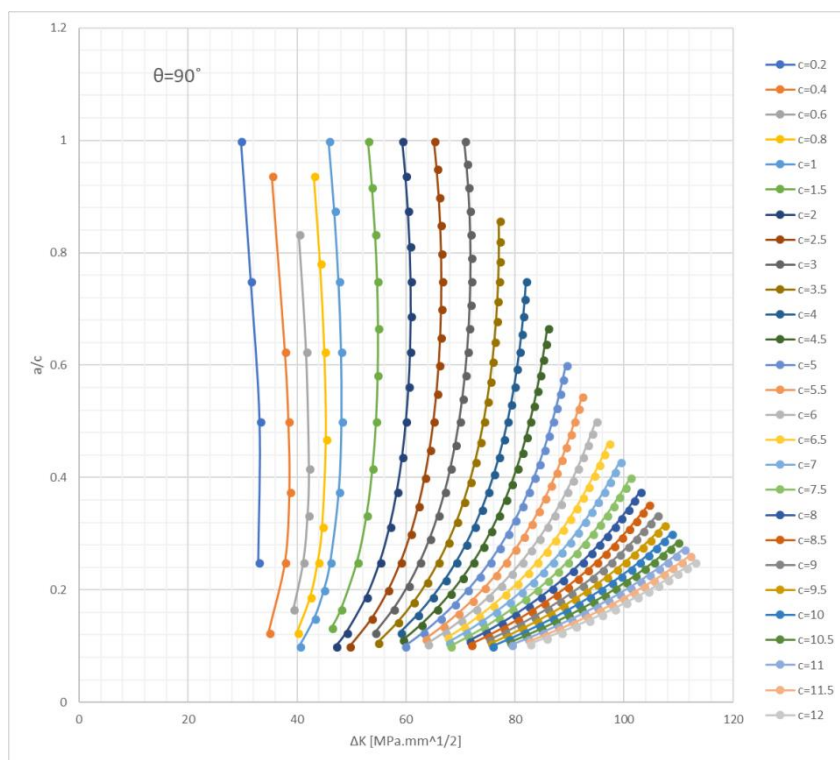
(b)



(c)



(d)



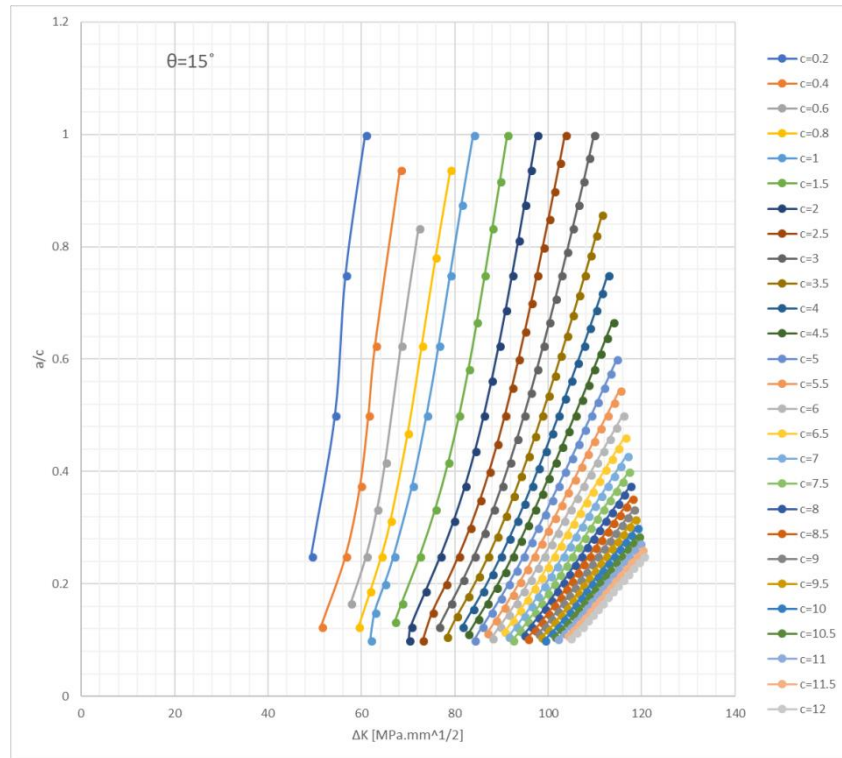
(e)

Figura B.1.1 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.

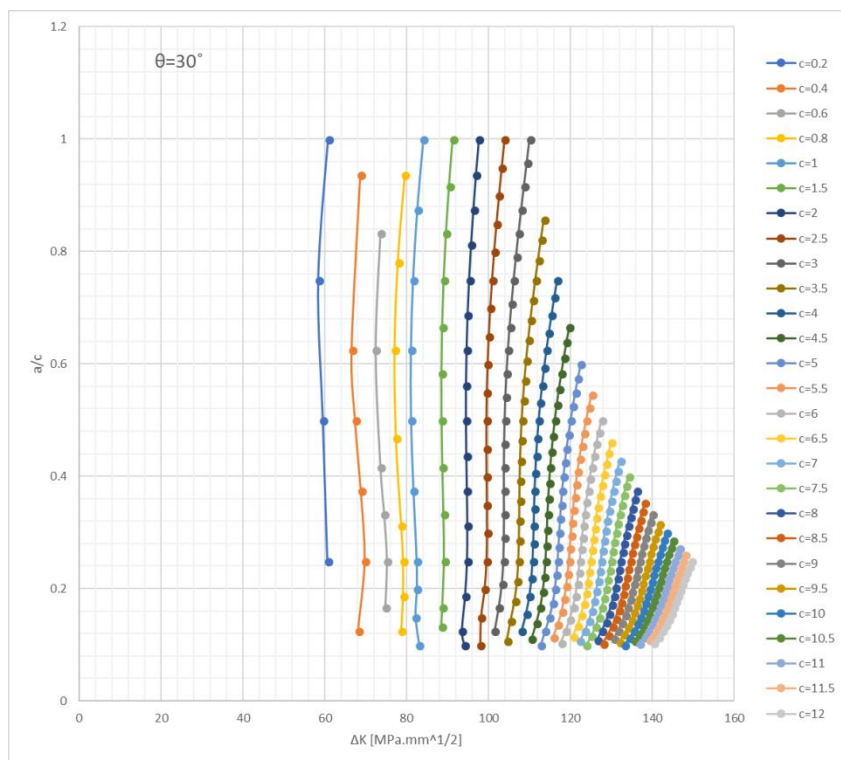


### B.1.2. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

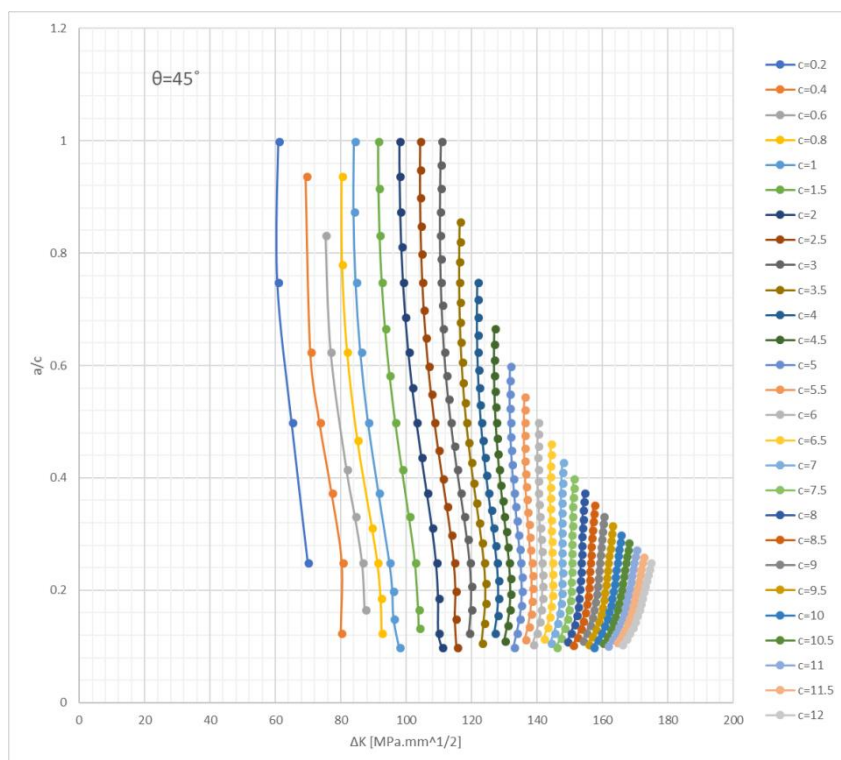
Neste anexo apresentam-se os gráficos representativos da evolução das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , com a relação de parâmetros  $a/c$ , para  $\theta$  igual a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , em (a), (b), (c), (d) e (e), respetivamente, correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito elíptico embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.



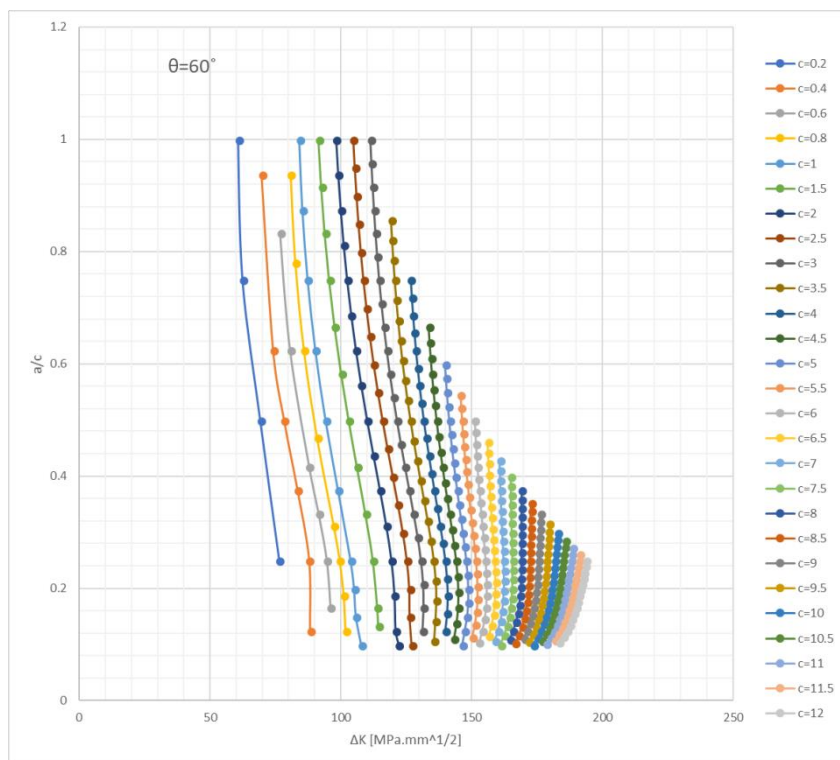
(a)



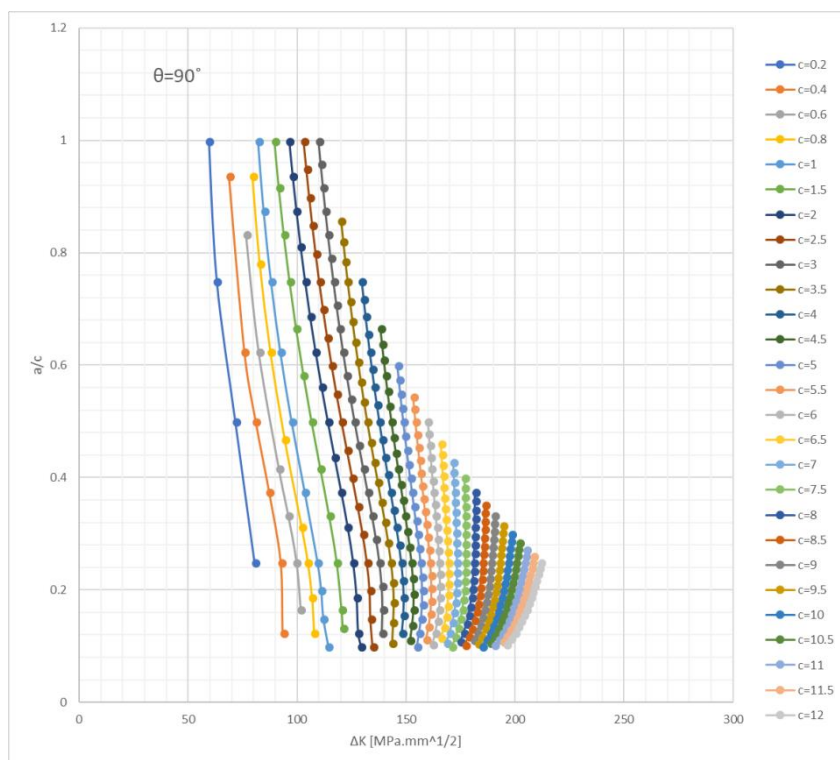
(b)



(c)



(d)

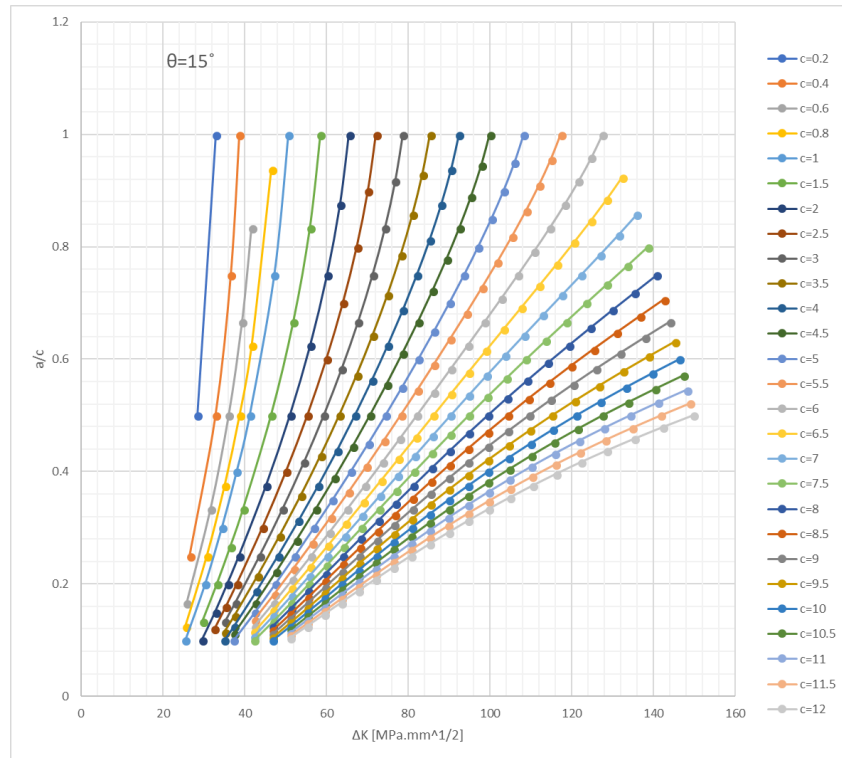


(e)

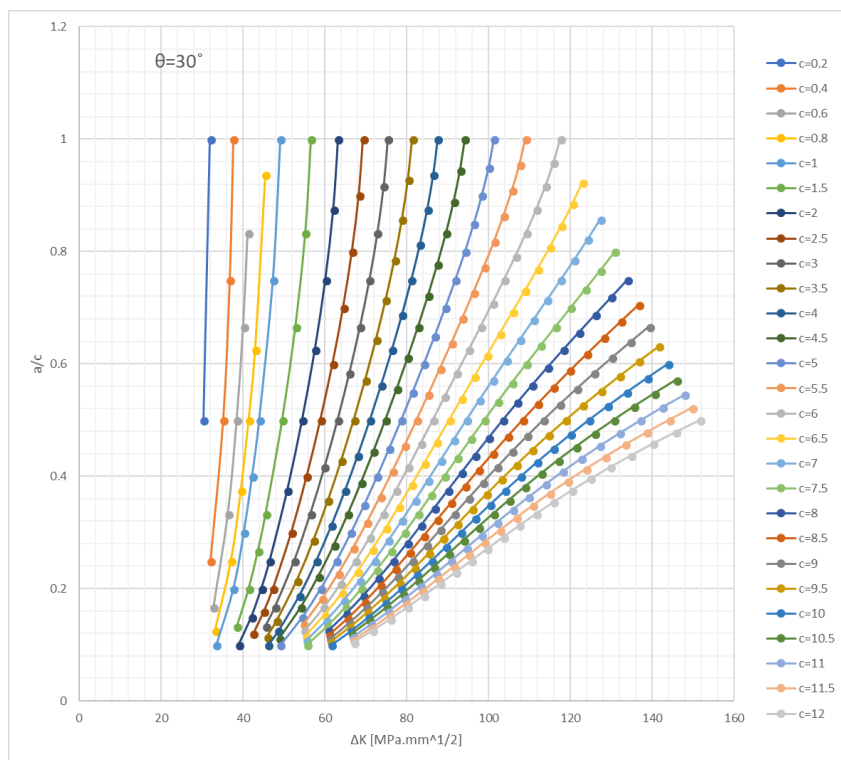
Figura B.1.2 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.

### B.1.3. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

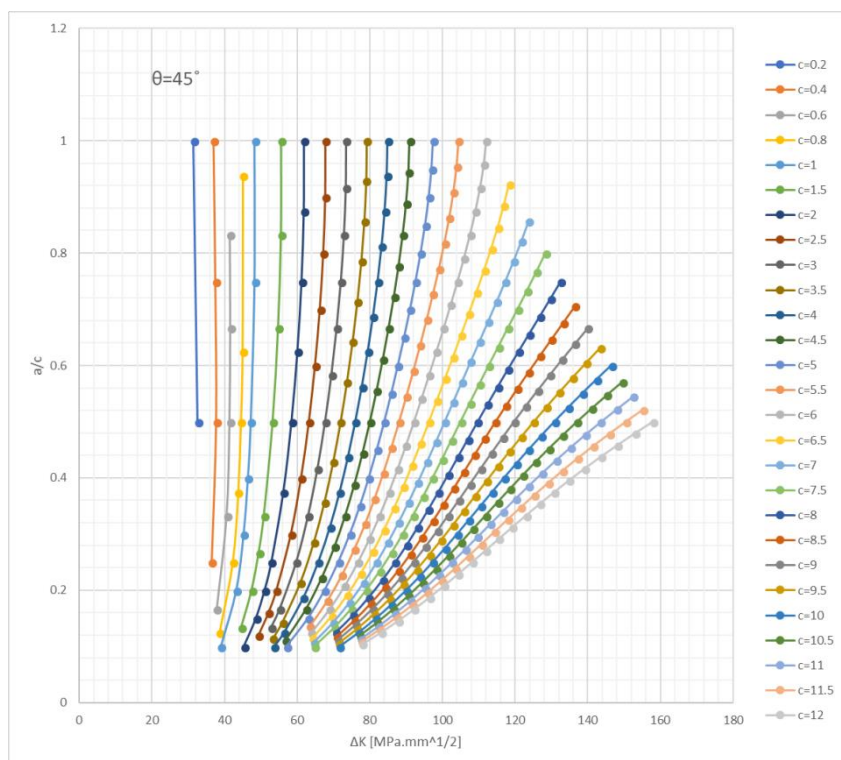
Neste anexo apresentam-se os gráficos representativos da evolução das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , com a relação de parâmetros  $a/c$ , para  $\theta$  igual a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , em (a), (b), (c), (d) e (e), respetivamente, correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito semi-elíptico superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.



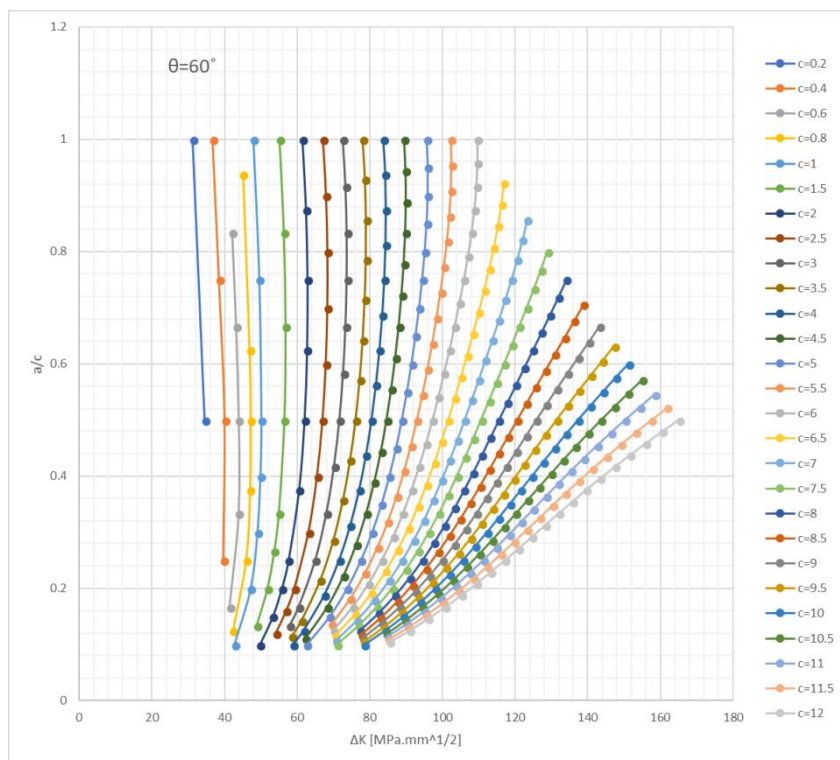
(a)



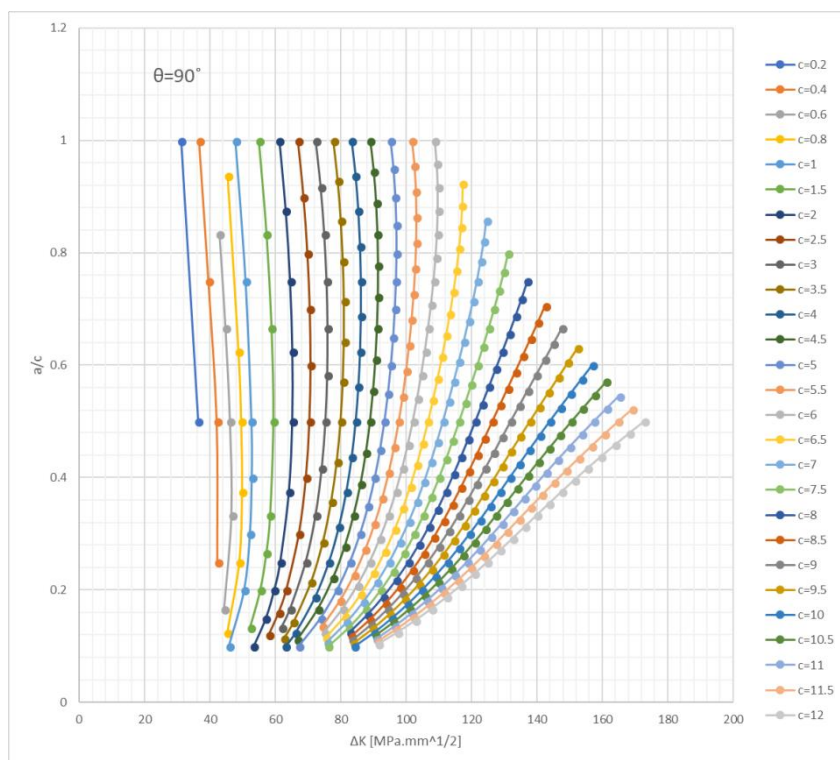
(b)



(c)



(d)



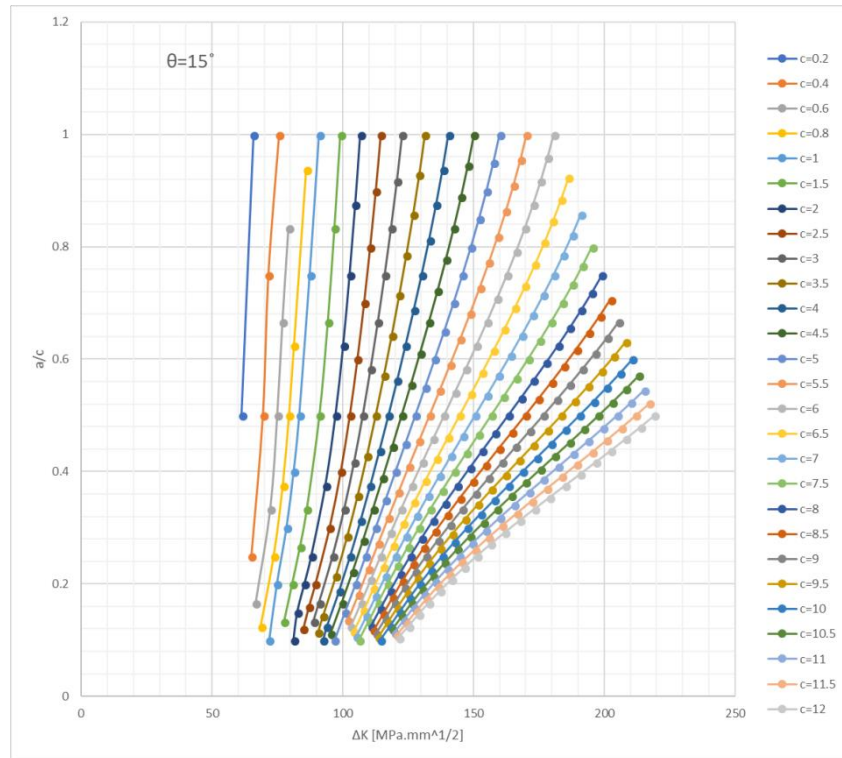
(e)

Figura B.1.3 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.

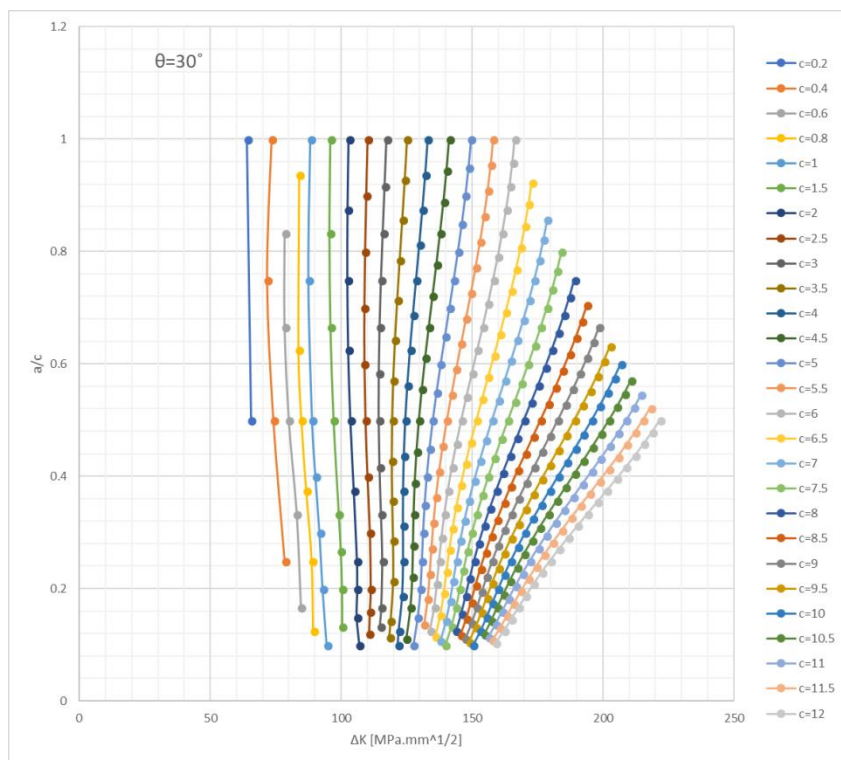


#### B.1.4. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

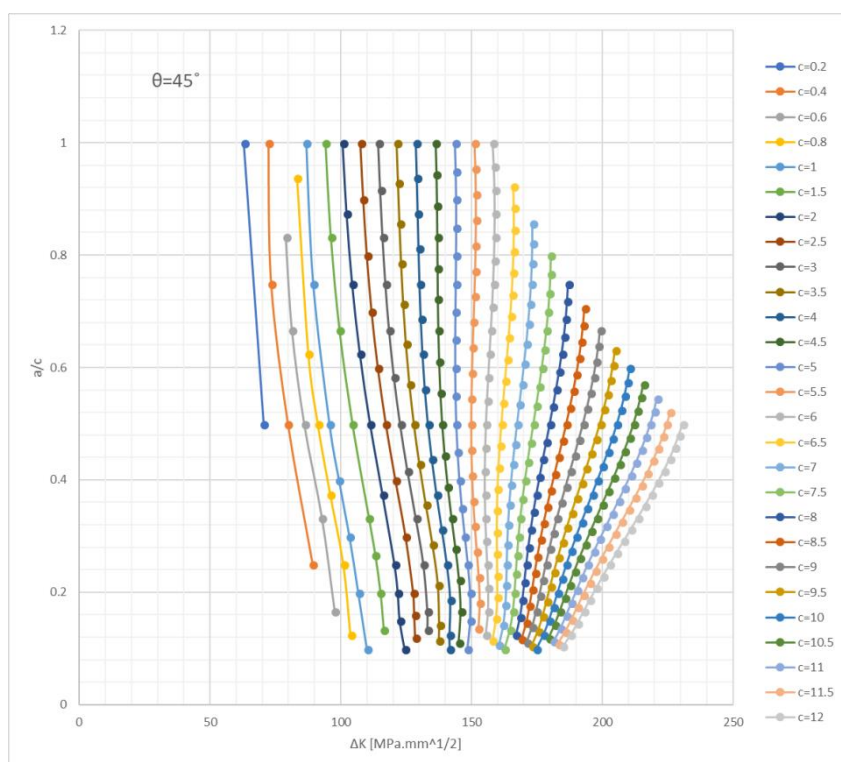
Neste anexo apresentam-se os gráficos representativos da evolução das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , com a relação de parâmetros  $a/c$ , para  $\theta$  igual a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , em (a), (b), (c), (d) e (e), respetivamente, correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito semi-elíptico superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.



(a)

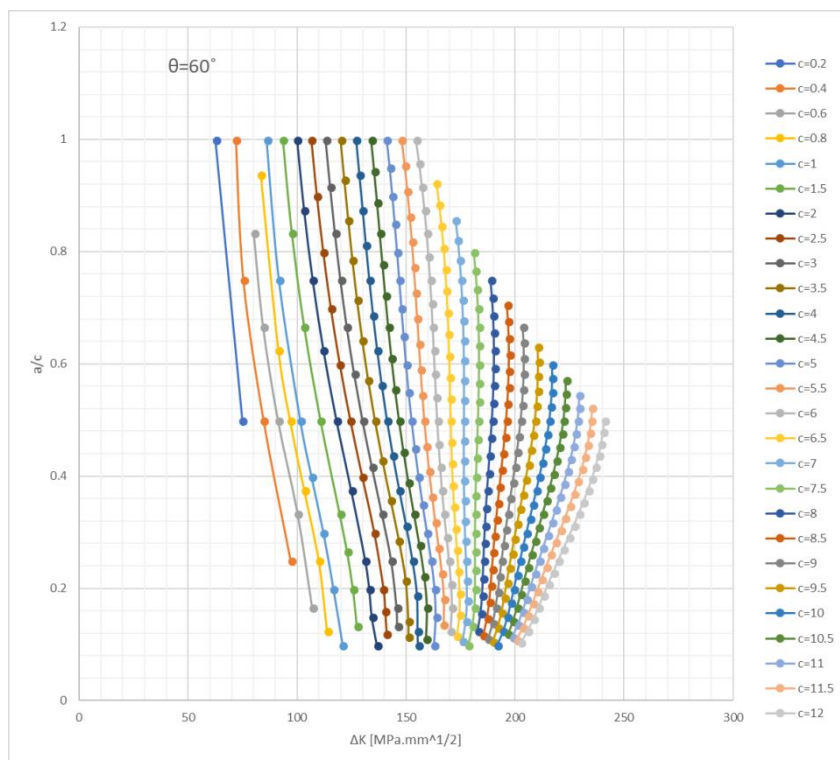


(b)

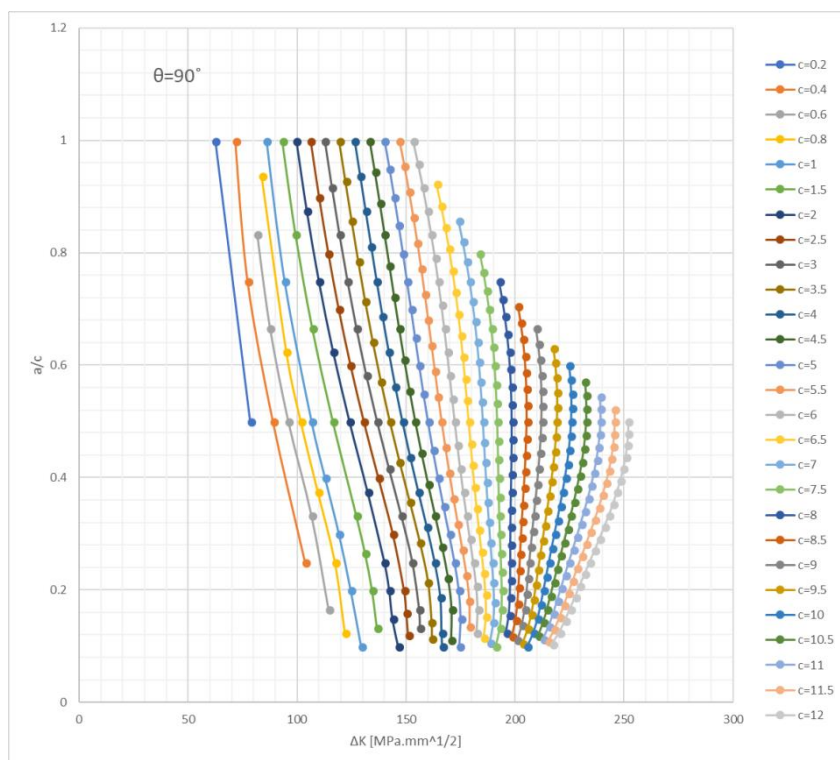


(c)





(d)

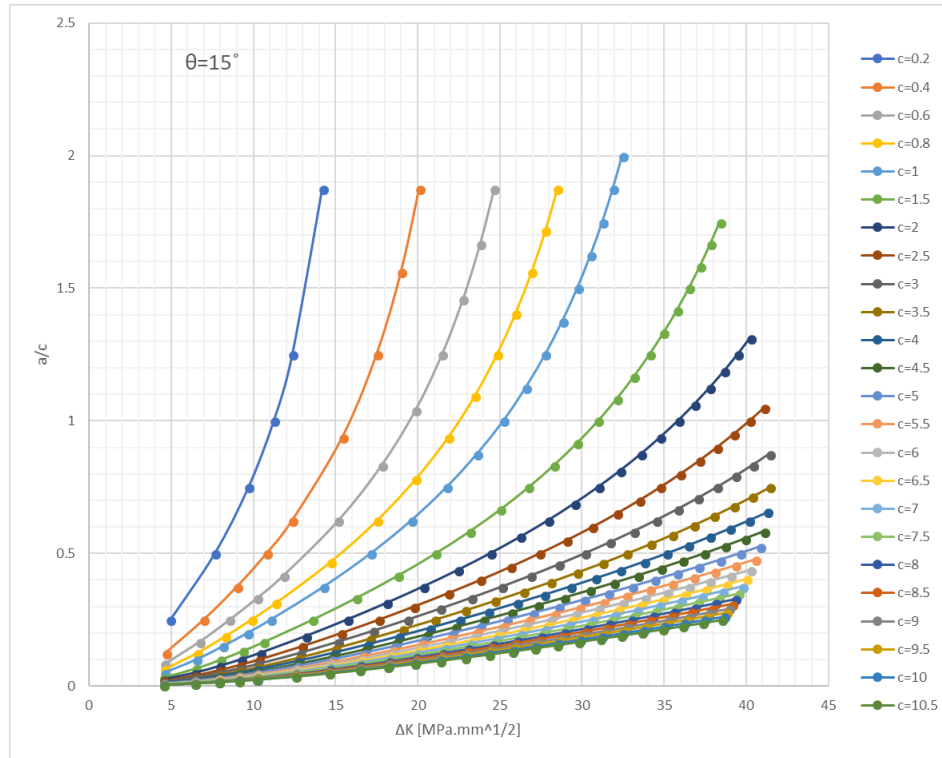


(e)

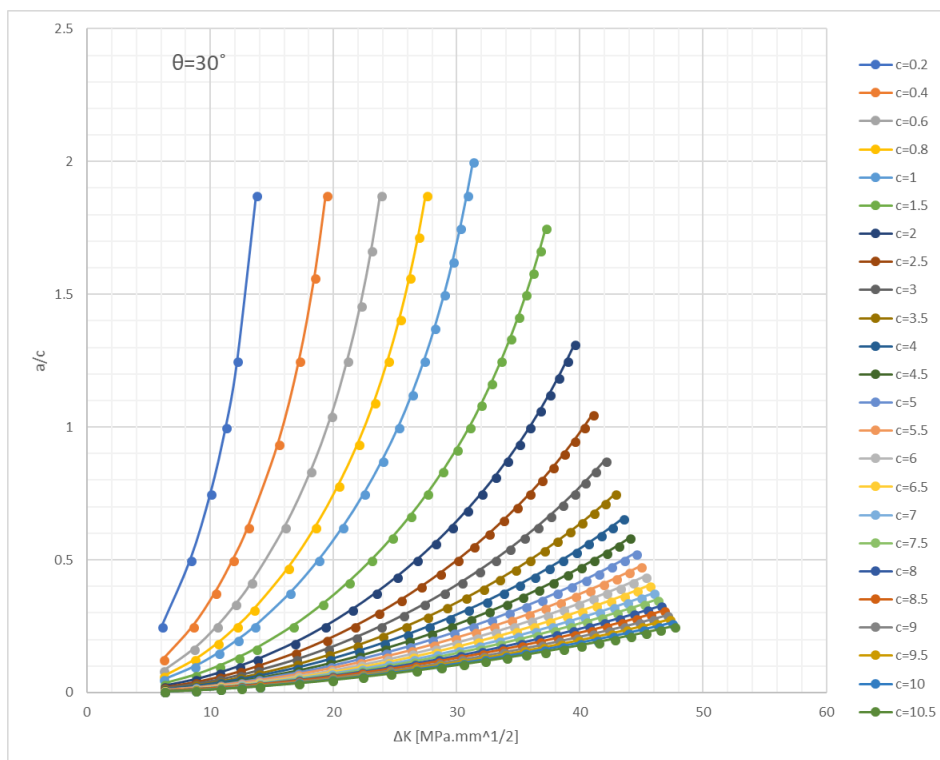
Figura B.1.4 – Gráficos do Conjunto A correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.

### B.1.5. Gráficos correspondentes a um defeito embebido na tampa

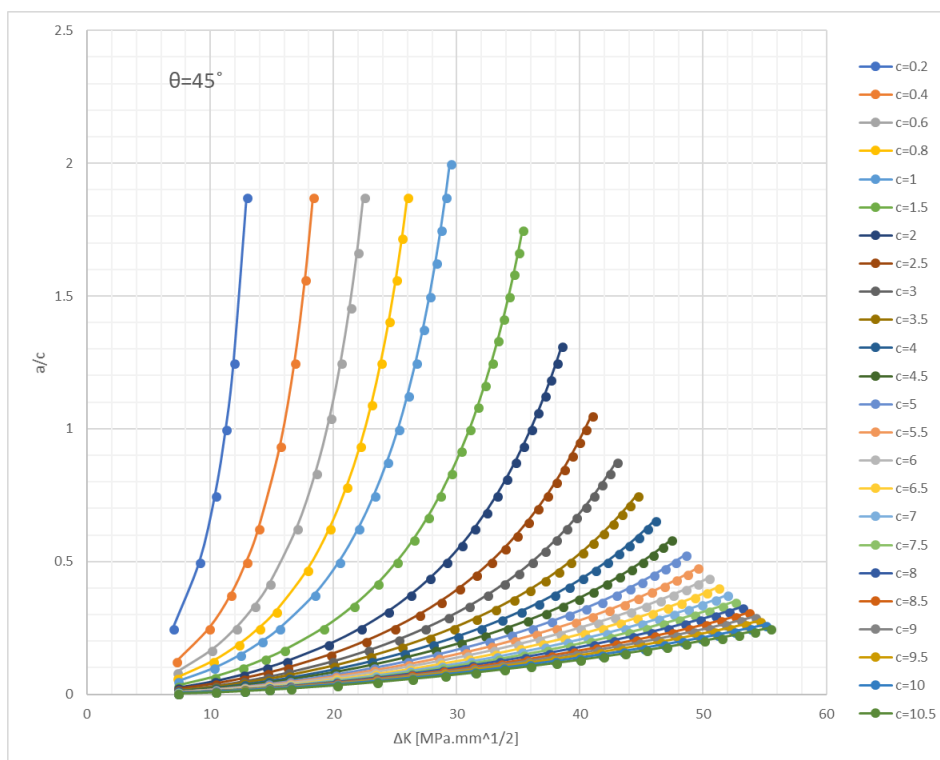
Neste anexo apresentam-se os gráficos representativos da evolução das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , com a relação de parâmetros  $a/c$ , para  $\theta$  igual a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , em (a), (b), (c), (d) e (e), respetivamente, correspondentes a um defeito elíptico embebido na tampa.



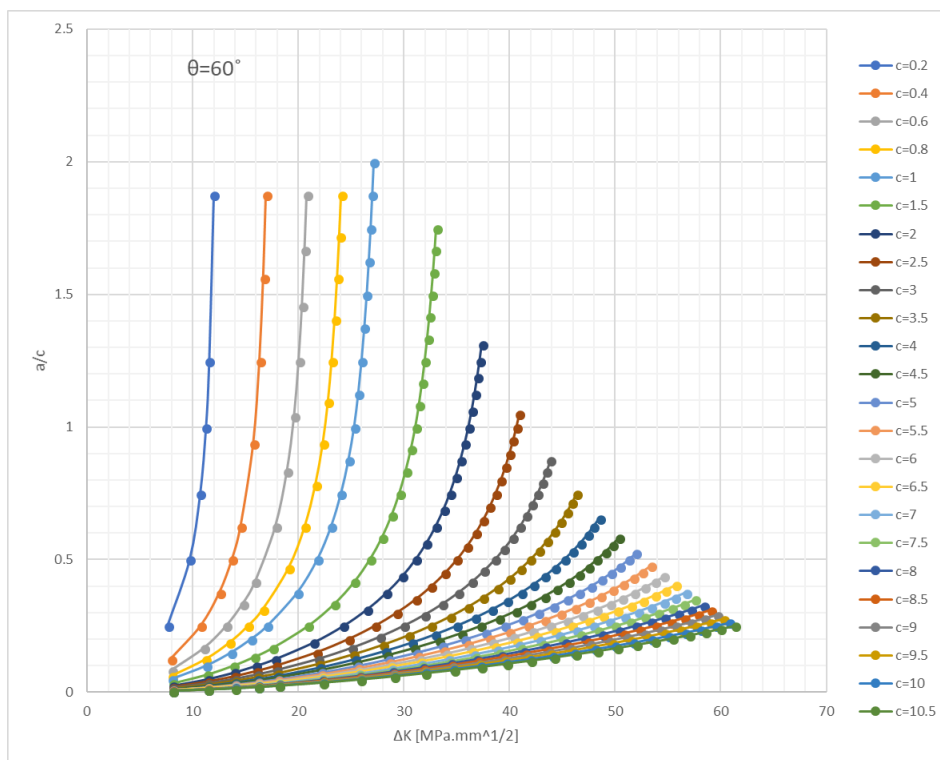
(a)



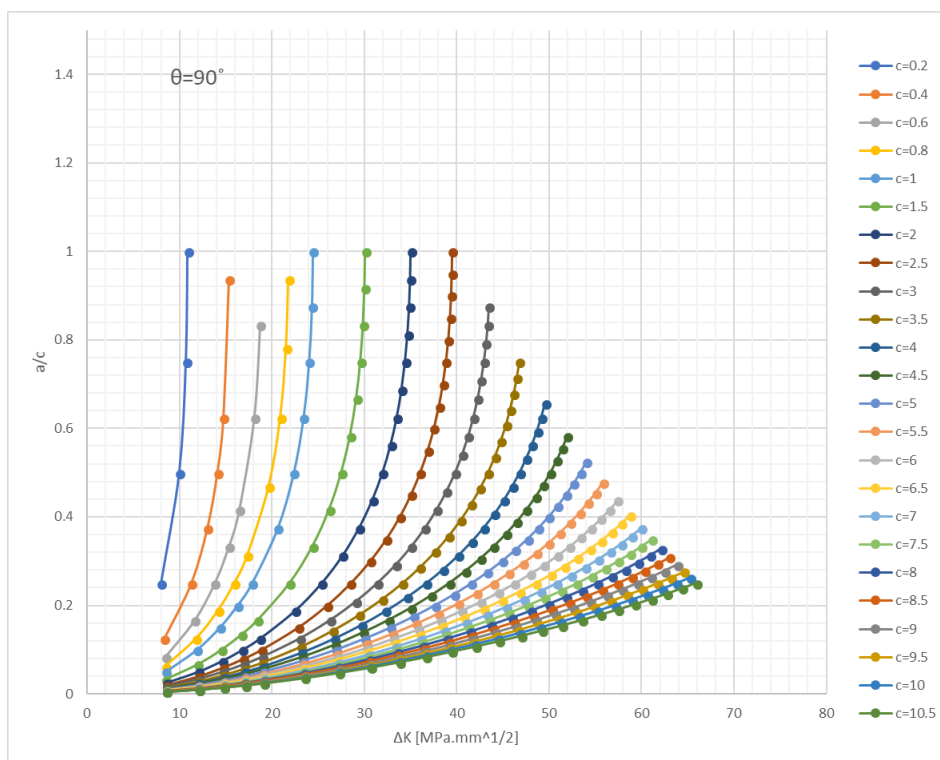
(b)



(c)



(d)

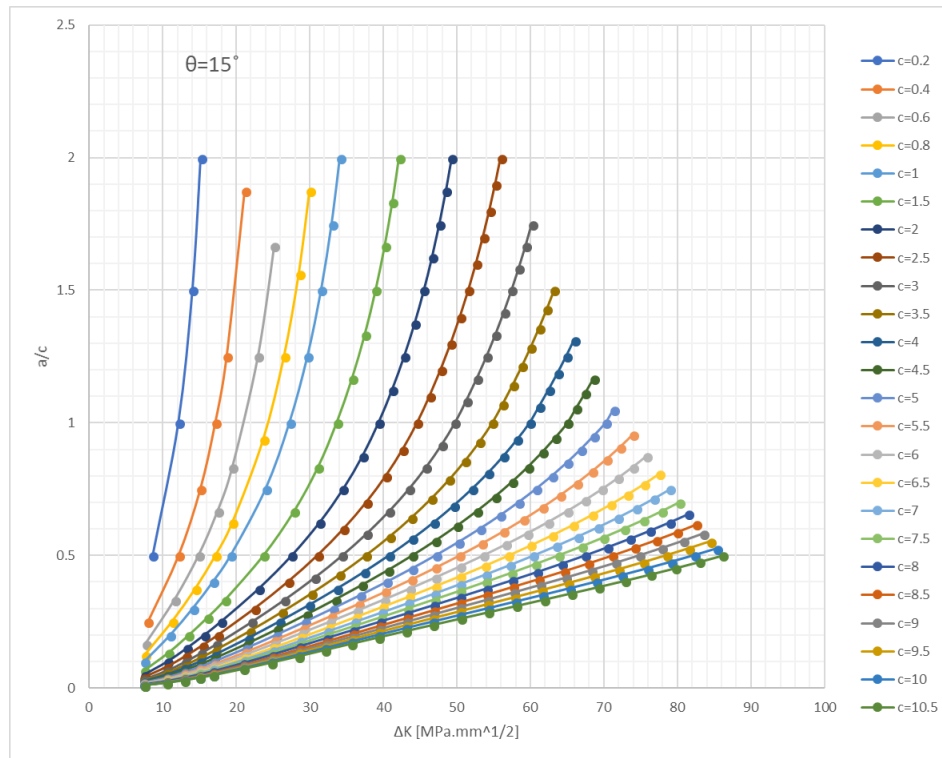


(e)

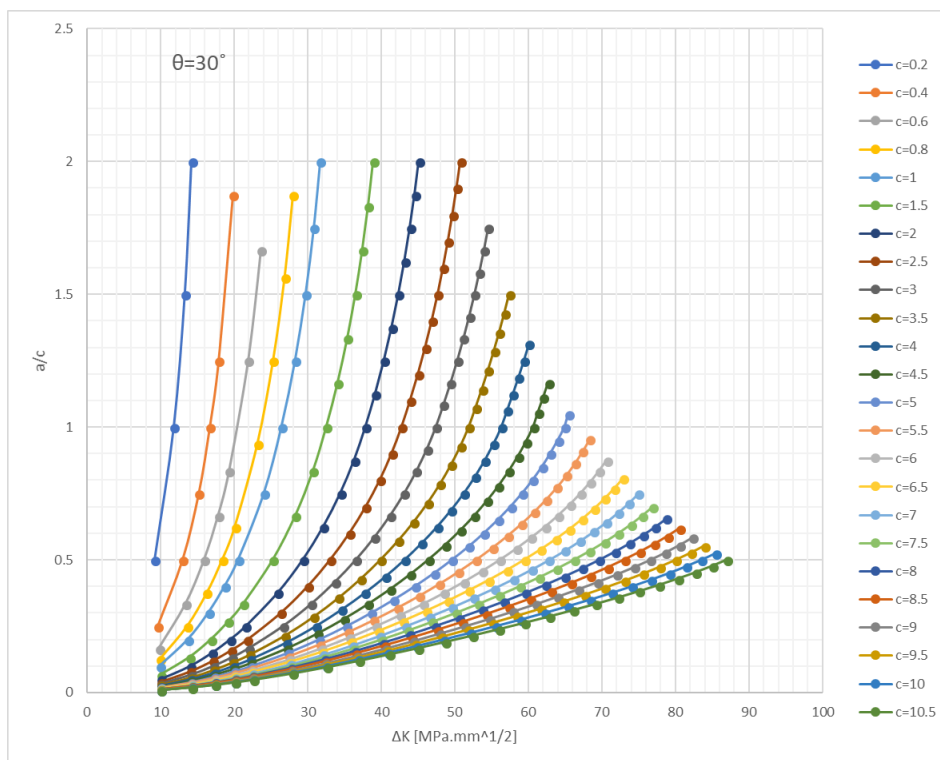
Figura B.1.5 – Gráficos do Conjunto A correspondentes a um defeito embebido na zona da tampa.

### B.1.6. Gráficos correspondentes a um defeito superficial na tampa

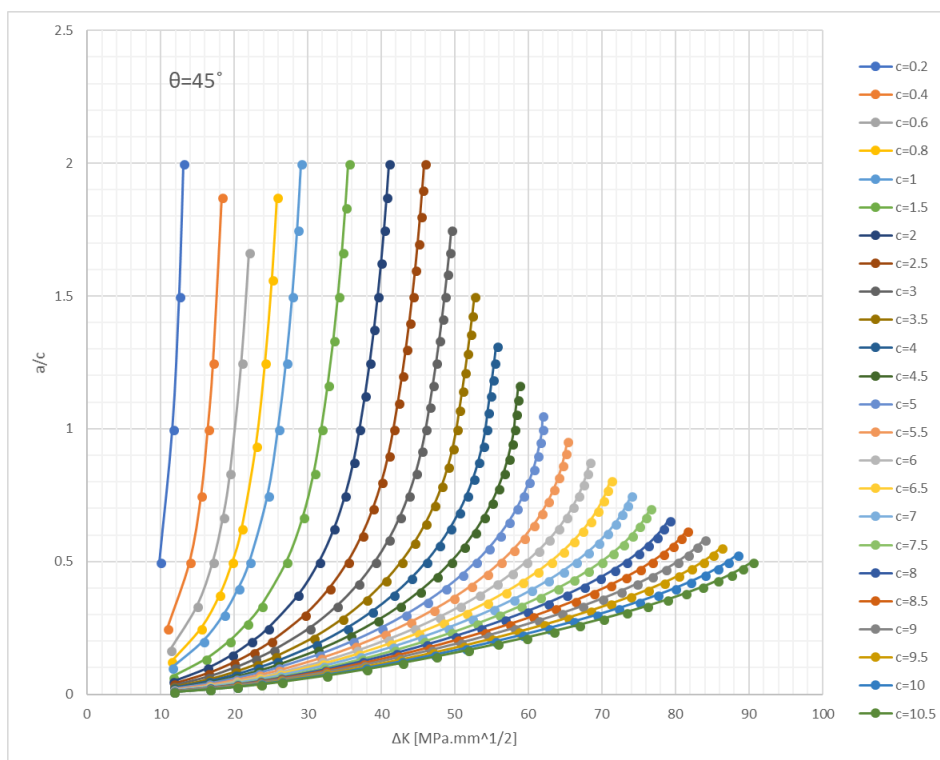
Neste anexo apresentam-se os gráficos representativos da evolução das gamas dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , com a relação de parâmetros  $a/c$ , para  $\theta$  igual a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , em (a), (b), (c), (d) e (e), respectivamente, correspondentes a um defeito semi-elíptico superficial na tampa.



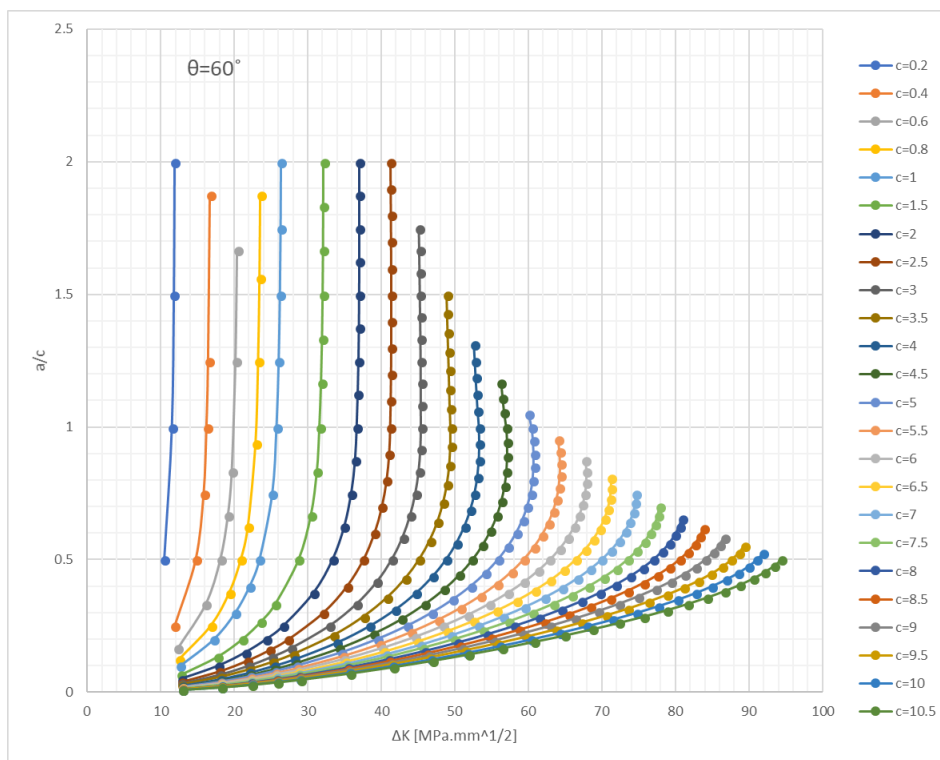
(a)



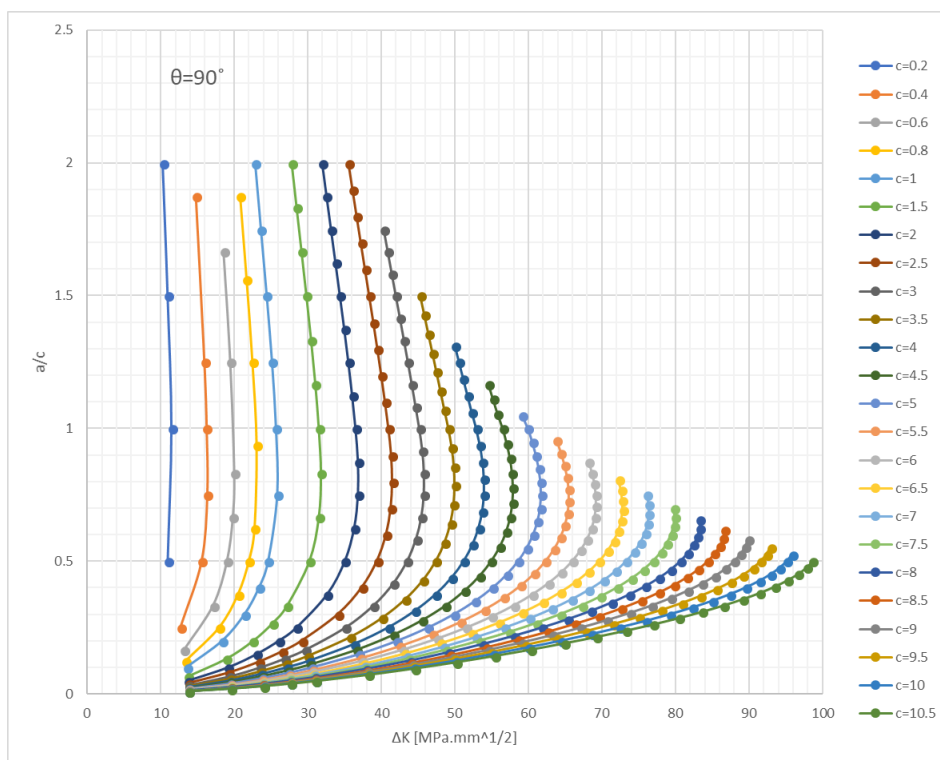
(b)



(c)



(d)



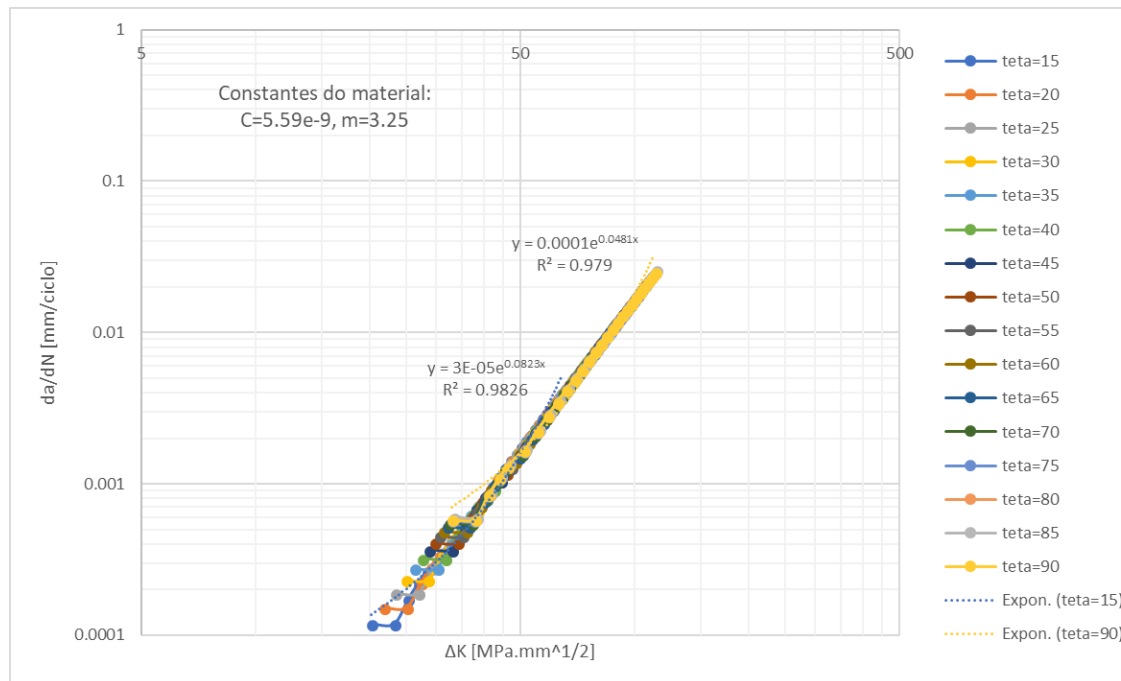
(e)

Figura B.1.6 – Gráficos do Conjunto A correspondentes a um defeito superficial na zona da tampa.

## B.2. Resultados das rotinas do Conjunto B

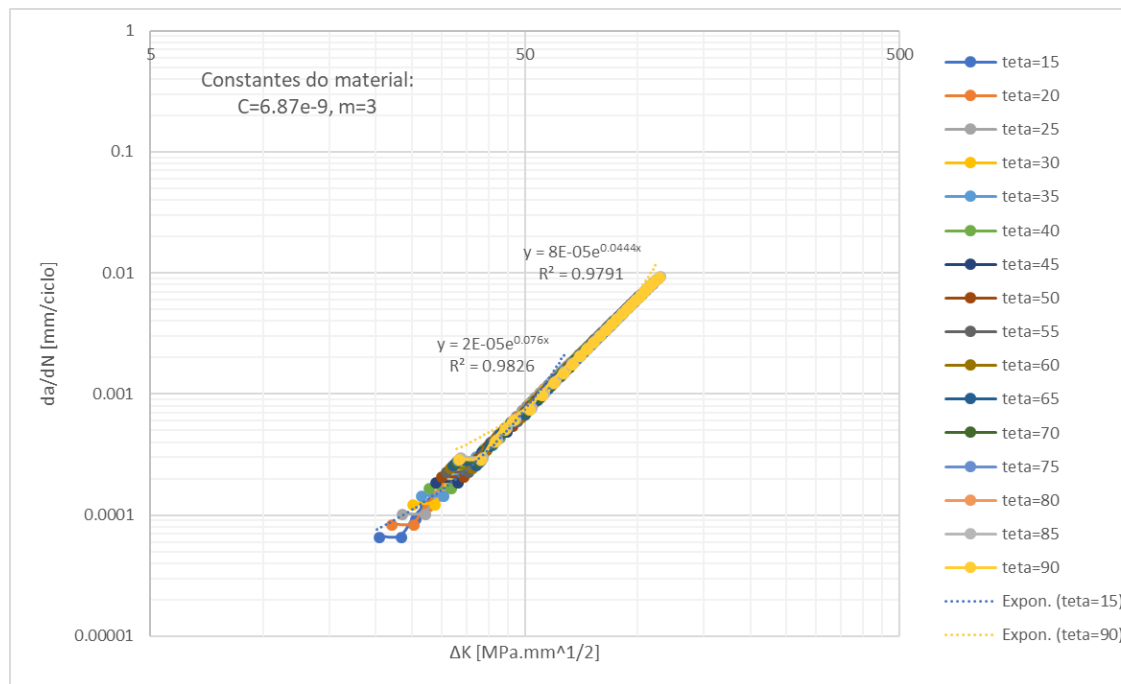
### B.2.1. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

Neste anexo encontram-se gráficos, associados ao ponto mais profundo de um defeito elíptico embebido num cordão de soldadura na zona central do corpo, descritivos da evolução da velocidade de propagação de fenda,  $da/dN$ , em função da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , em (a) e (b); gráficos que relacionam o número de ciclos efetuados,  $N$ , e o tamanho de fenda,  $a$ , em (c) e (d), para as constantes de material correspondentes a uma microestrutura austenítica e ferrítico-perlítica, respetivamente; e por último, um gráfico representativo da evolução de  $\Delta K$  em função de  $a$ , em (e).

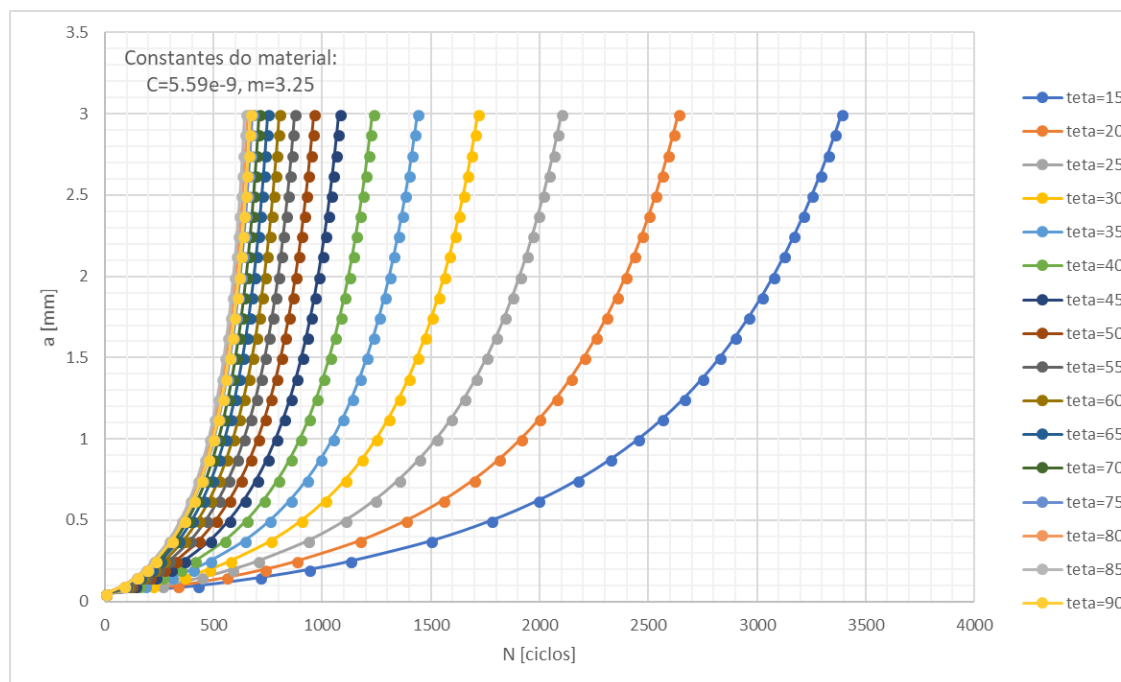


(a)

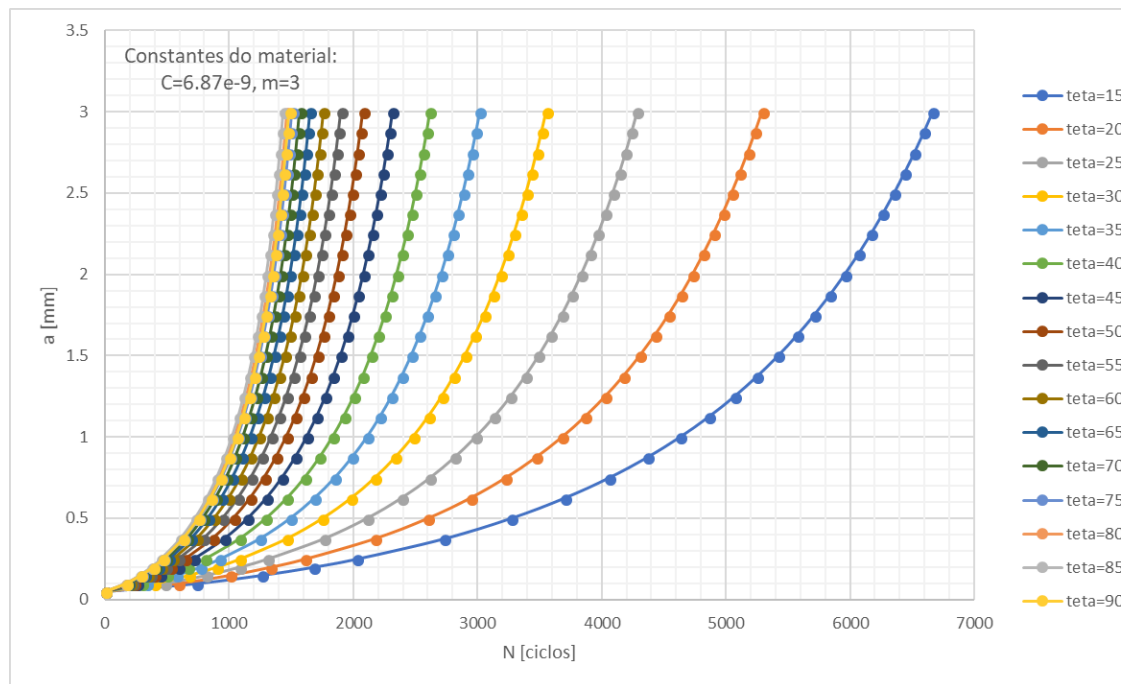




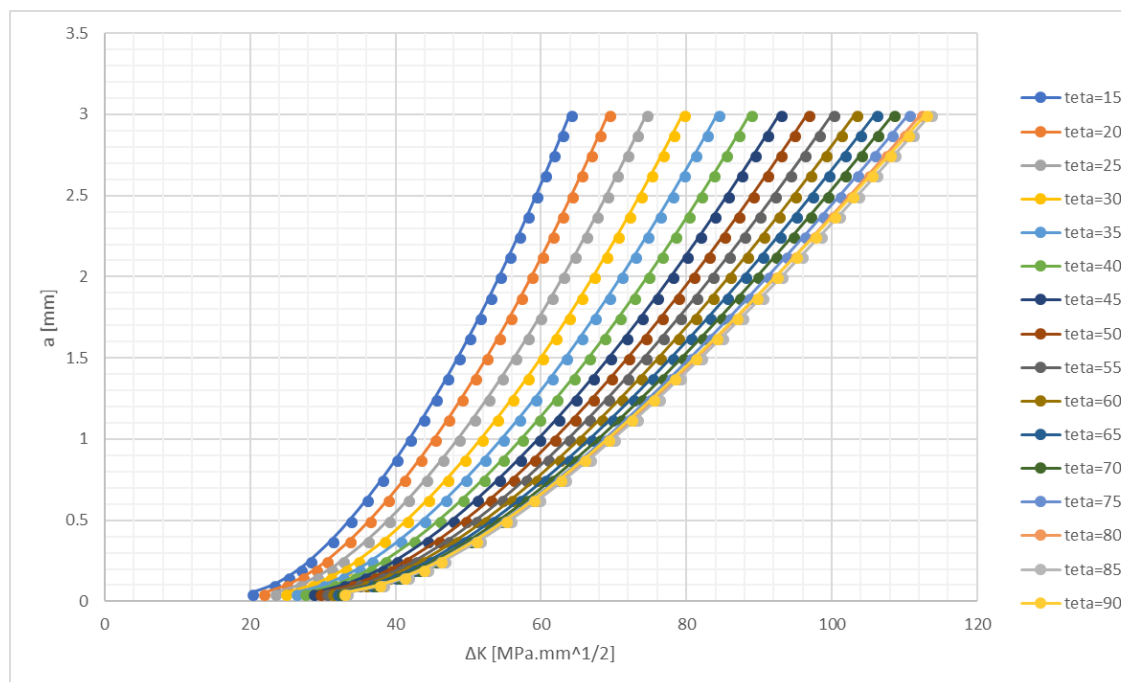
(b)



(c)



(d)

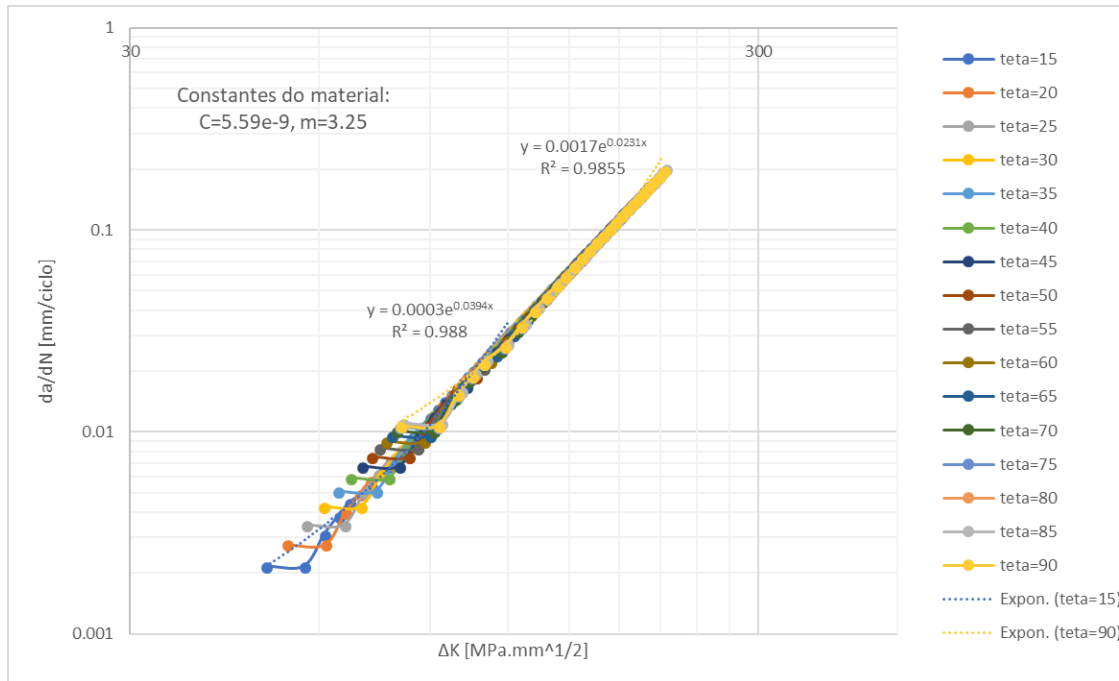


(e)

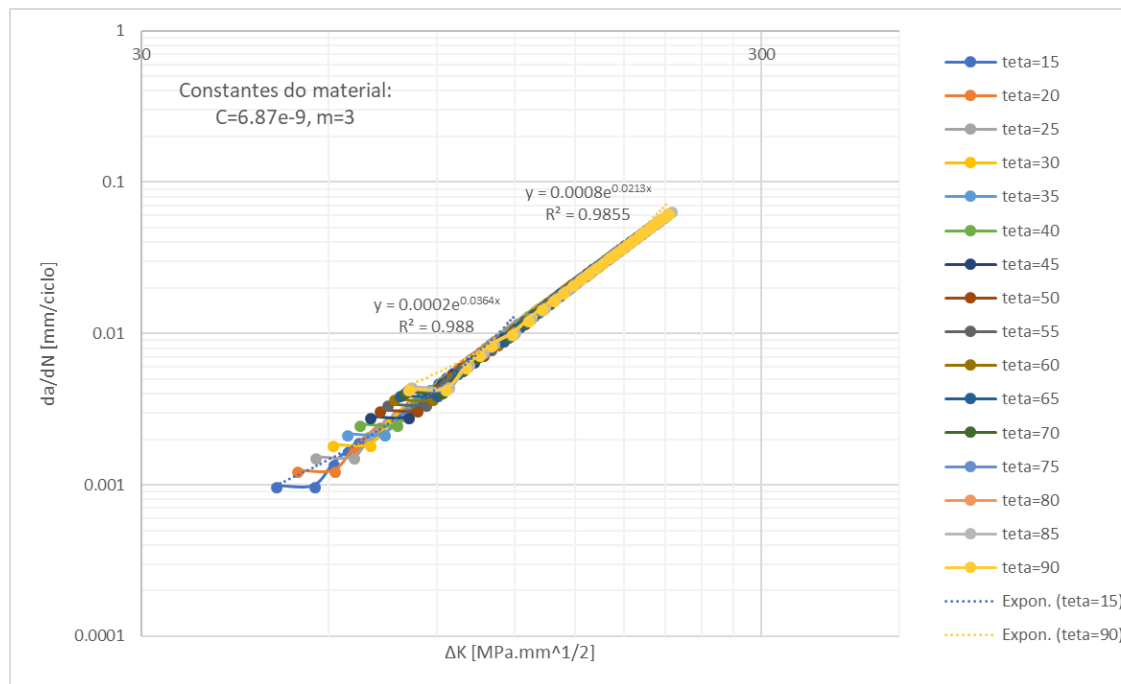
Figura B.2.1 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo.

### B.2.2. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embebido no cordão de soldadura na zona central do corpo

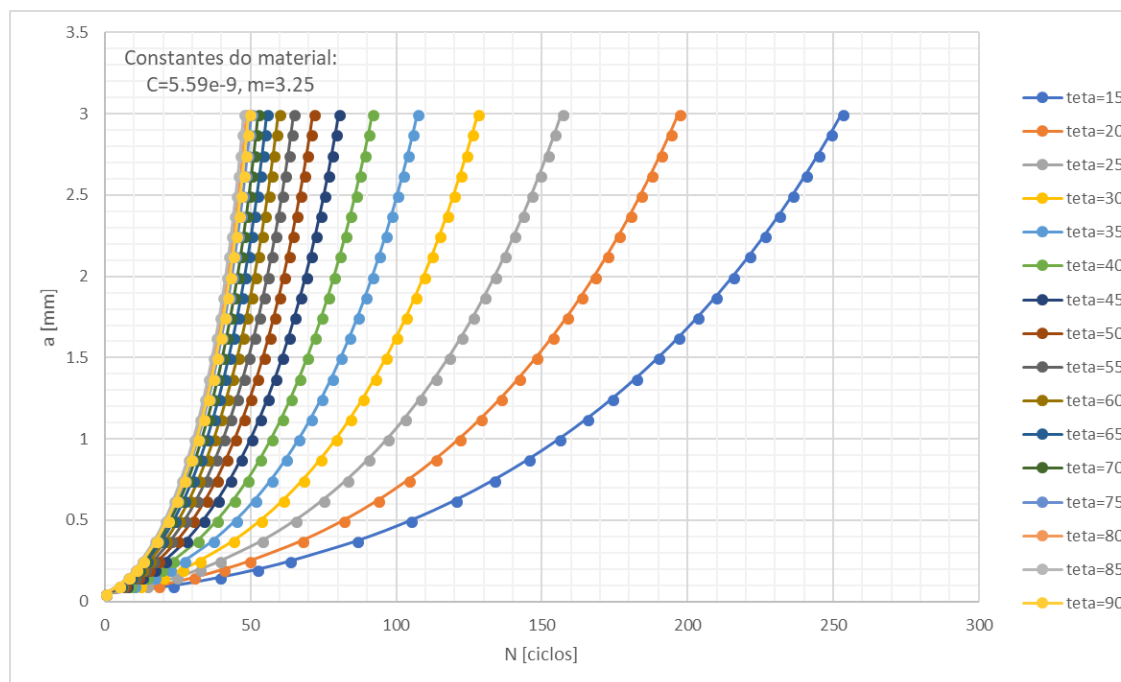
Neste anexo encontram-se gráficos, associados ao ponto menos profundo de um defeito elíptico embebido num cordão de soldadura na zona central do corpo, descritivos da evolução da velocidade de propagação de fenda,  $da/dN$ , em função da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , em (a) e (b); gráficos que relacionam o número de ciclos efetuados,  $N$ , e o tamanho de fenda,  $a$ , em (c) e (d), para as constantes de material correspondentes a uma microestrutura austenítica e ferrítico-perlítica, respetivamente; e por último, um gráfico representativo da evolução de  $\Delta K$  em função de  $a$ , em (e).



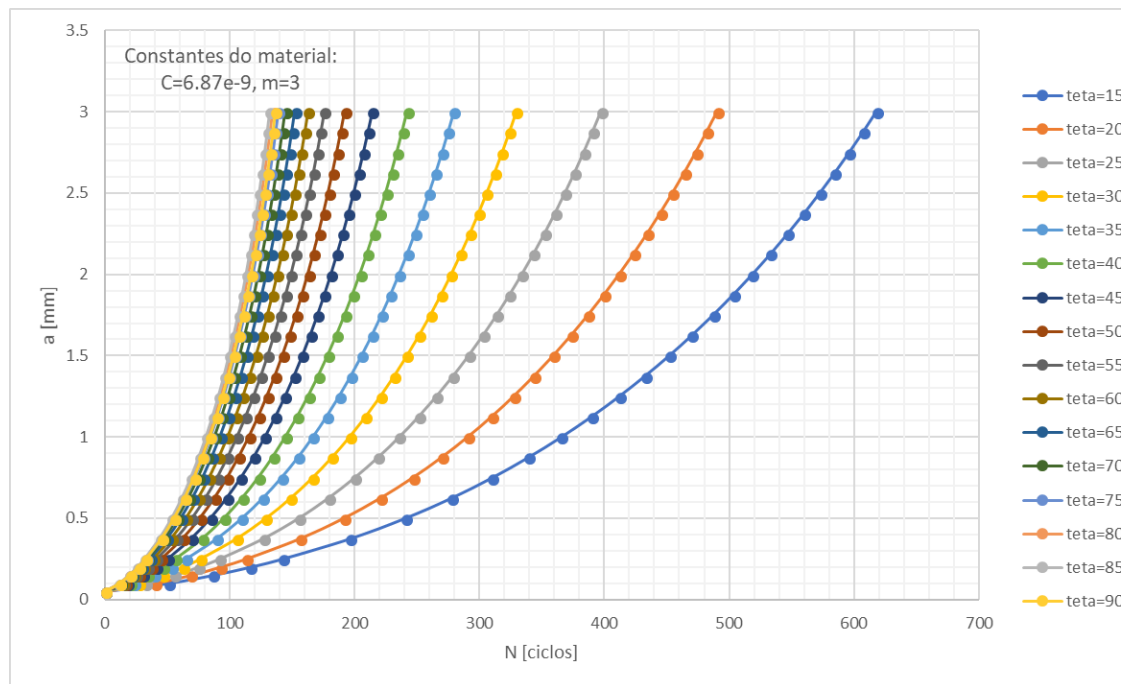
(a)



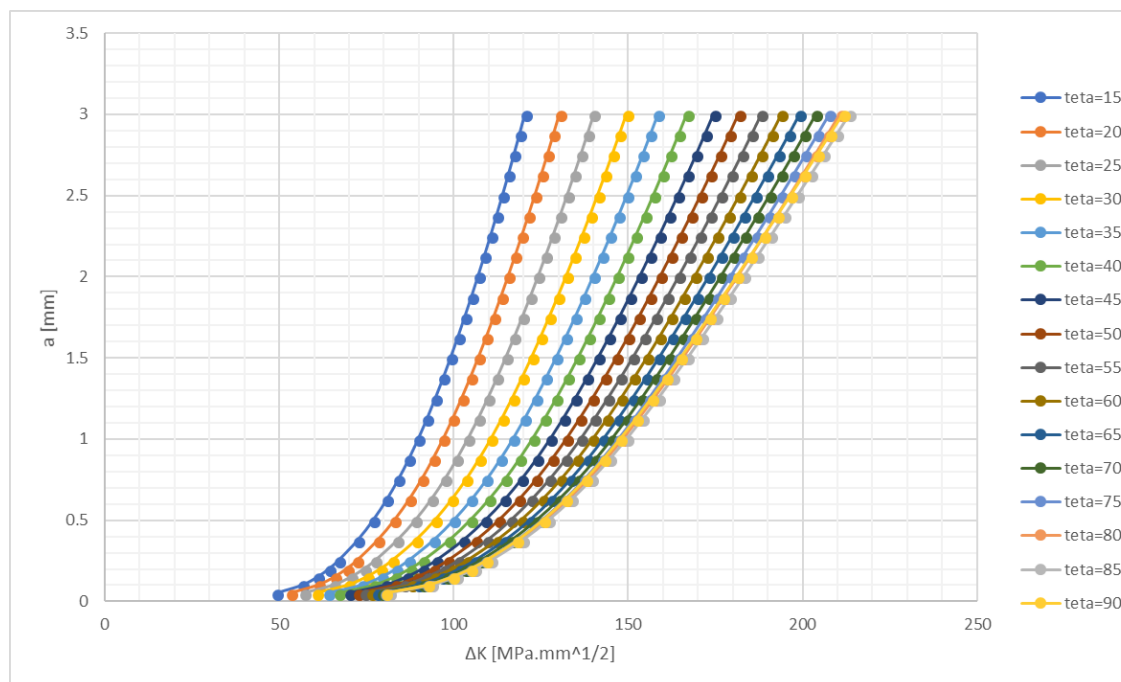
(b)



(c)



(d)

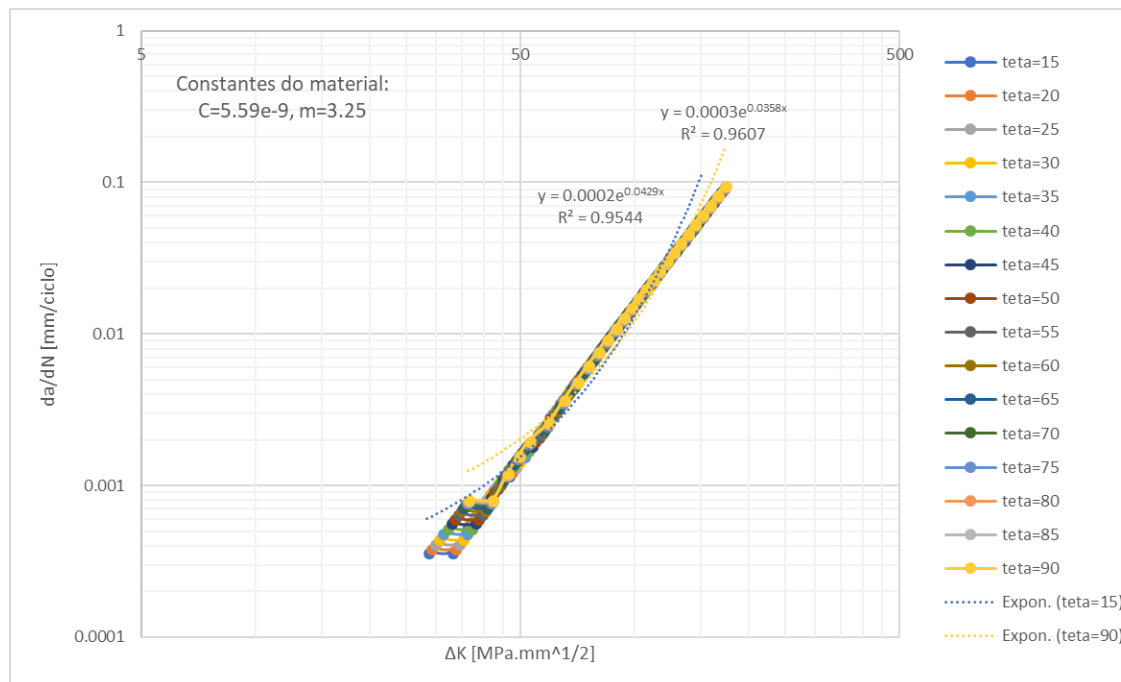


(e)

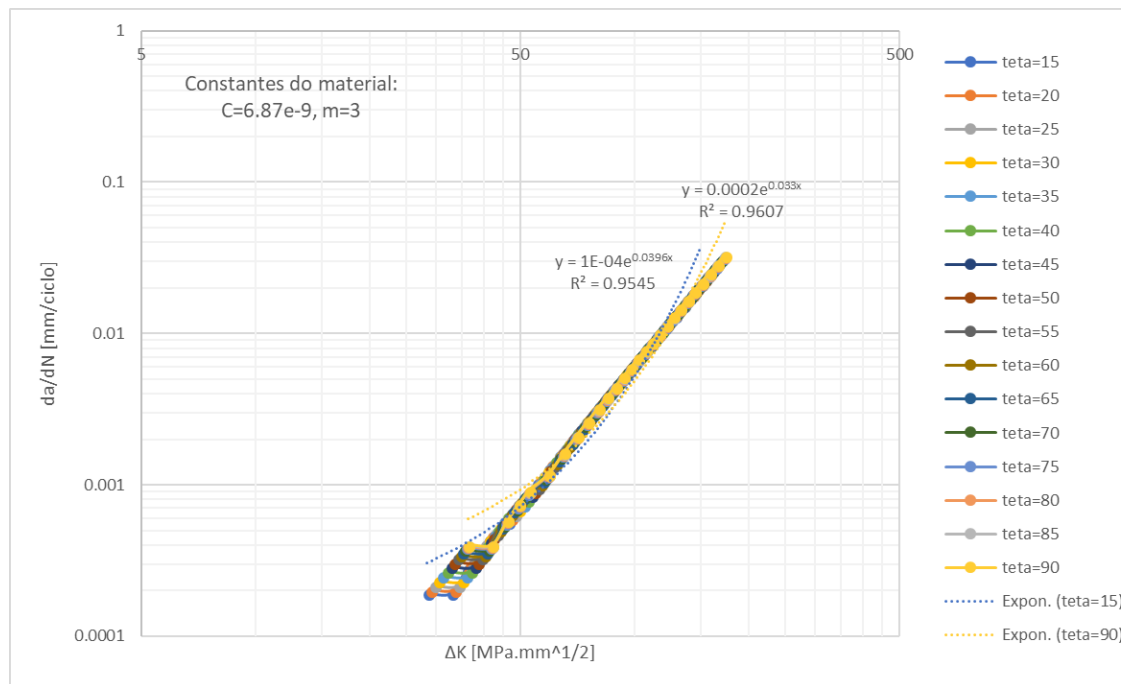
Figura B.2.2 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito embecido no cordão de soldadura na zona central do corpo.

### B.2.3. Gráficos correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

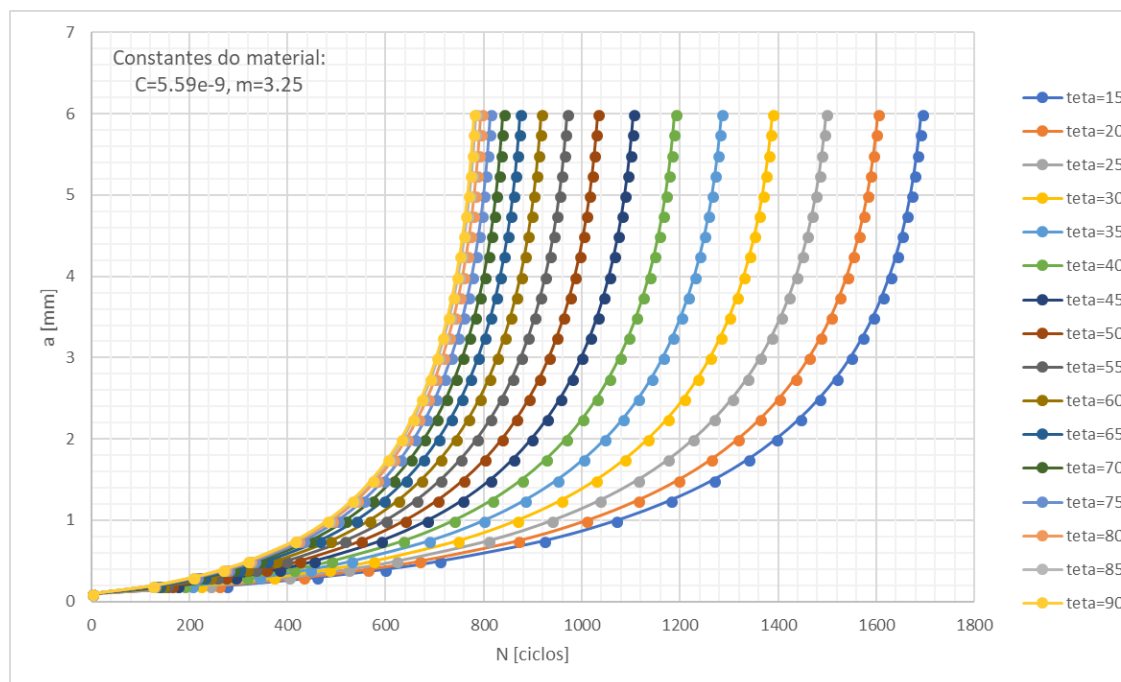
Neste anexo encontram-se gráficos, associados ao ponto mais profundo de um defeito semi-elíptico superficial num cordão de soldadura na zona central do corpo, descritivos da evolução da velocidade de propagação de fenda,  $da/dN$ , em função da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , em (a) e (b); gráficos que relacionam o número de ciclos efetuados,  $N$ , e o tamanho de fenda,  $a$ , em (c) e (d), para as constantes de material correspondentes a uma microestrutura austenítica e ferrítico-perlítica, respetivamente; e por último, um gráfico representativo da evolução de  $\Delta K$  em função de  $a$ , em (e).



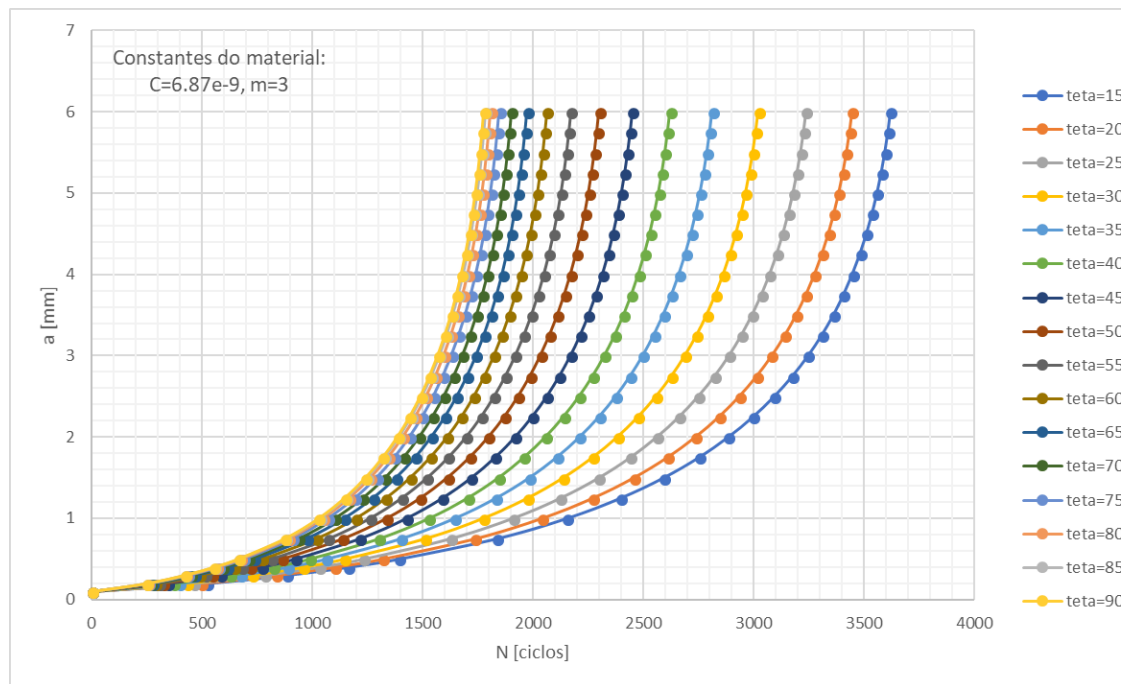
(a)



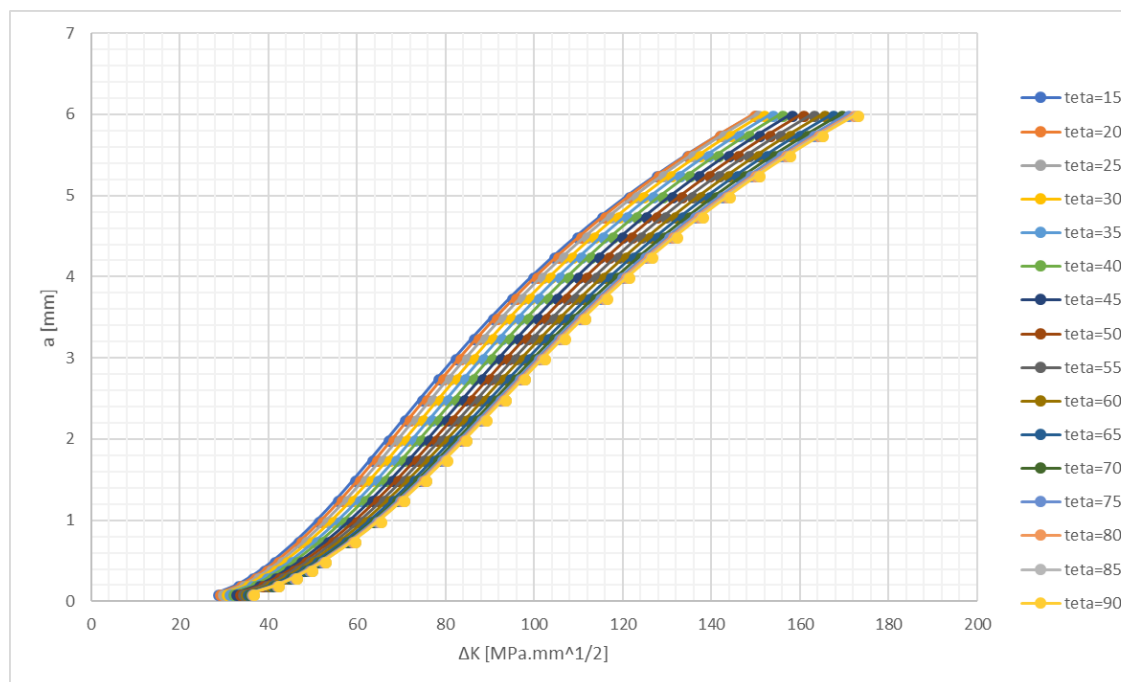
(b)



(c)



(d)



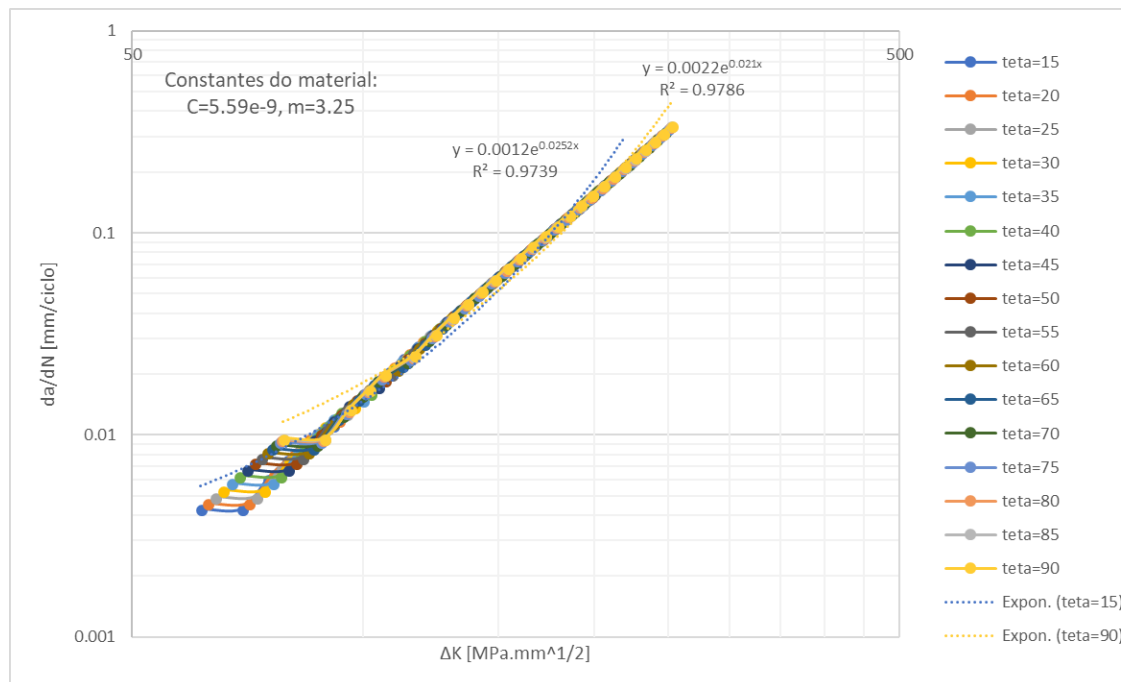
(e)

Figura B.2.3 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto mais profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.

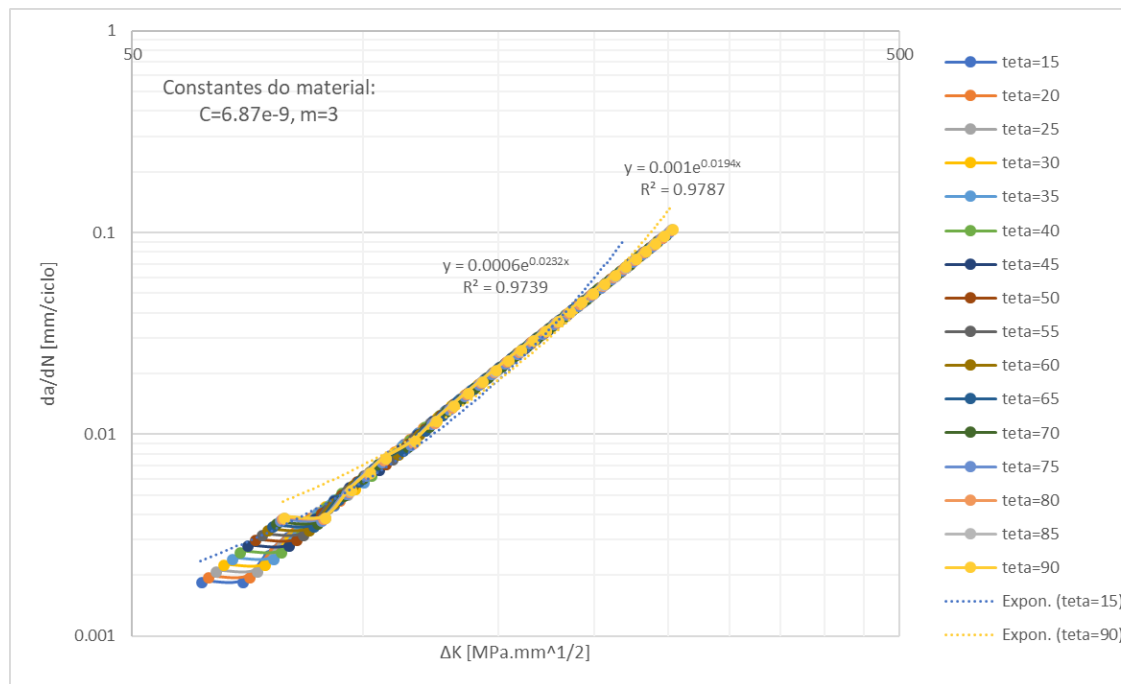


#### B.2.4. Gráficos correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo

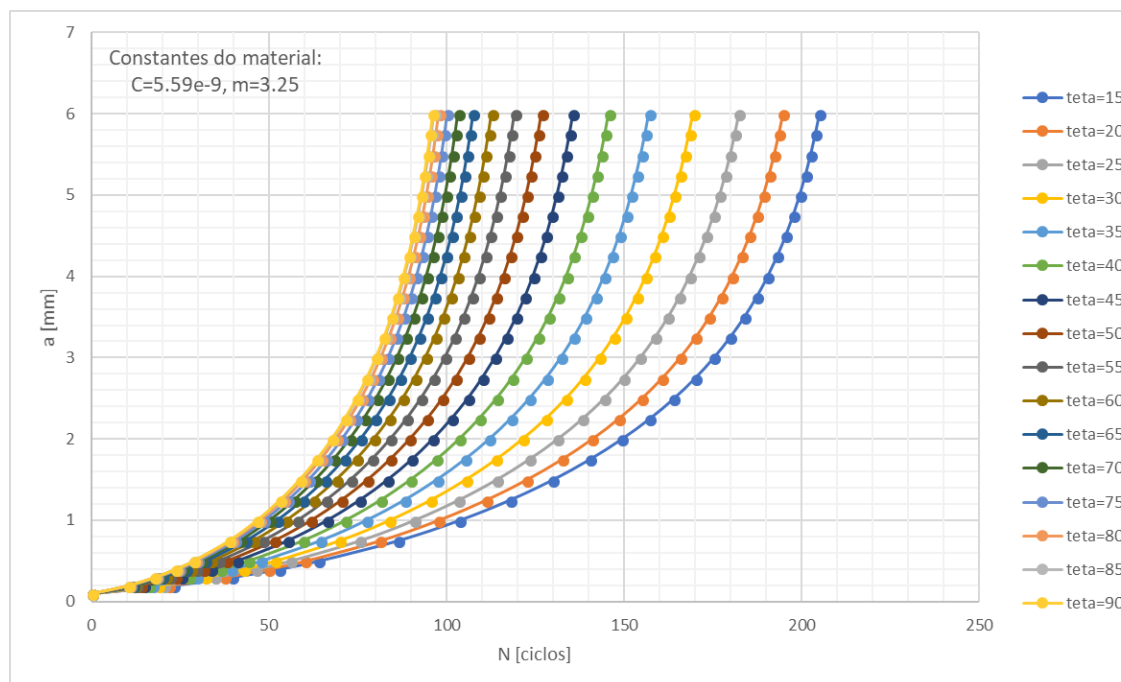
Neste anexo encontram-se gráficos, associados ao ponto menos profundo de um defeito semi-elíptico superficial num cordão de soldadura na zona central do corpo, descritivos da evolução da velocidade de propagação de fenda,  $da/dN$ , em função da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , em (a) e (b); gráficos que relacionam o número de ciclos efetuados,  $N$ , e o tamanho de fenda,  $a$ , em (c) e (d), para as constantes de material correspondentes a uma microestrutura austenítica e ferrítico-perlítica, respetivamente; e por último, um gráfico representativo da evolução de  $\Delta K$  em função de  $a$ , em (e).



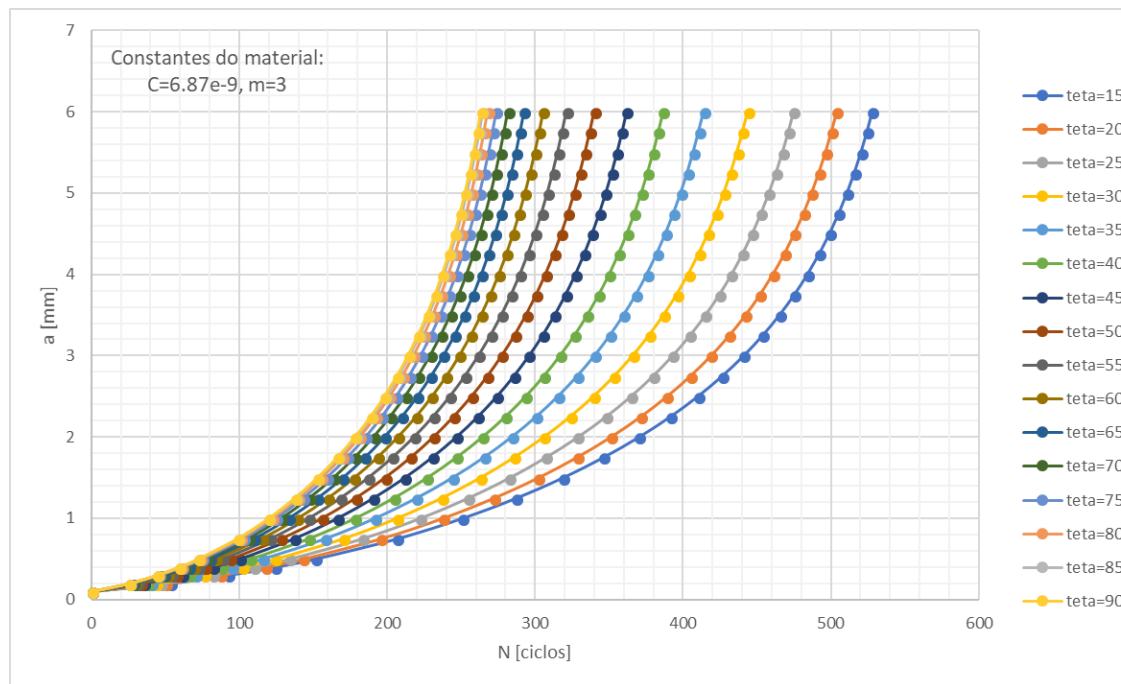
(a)



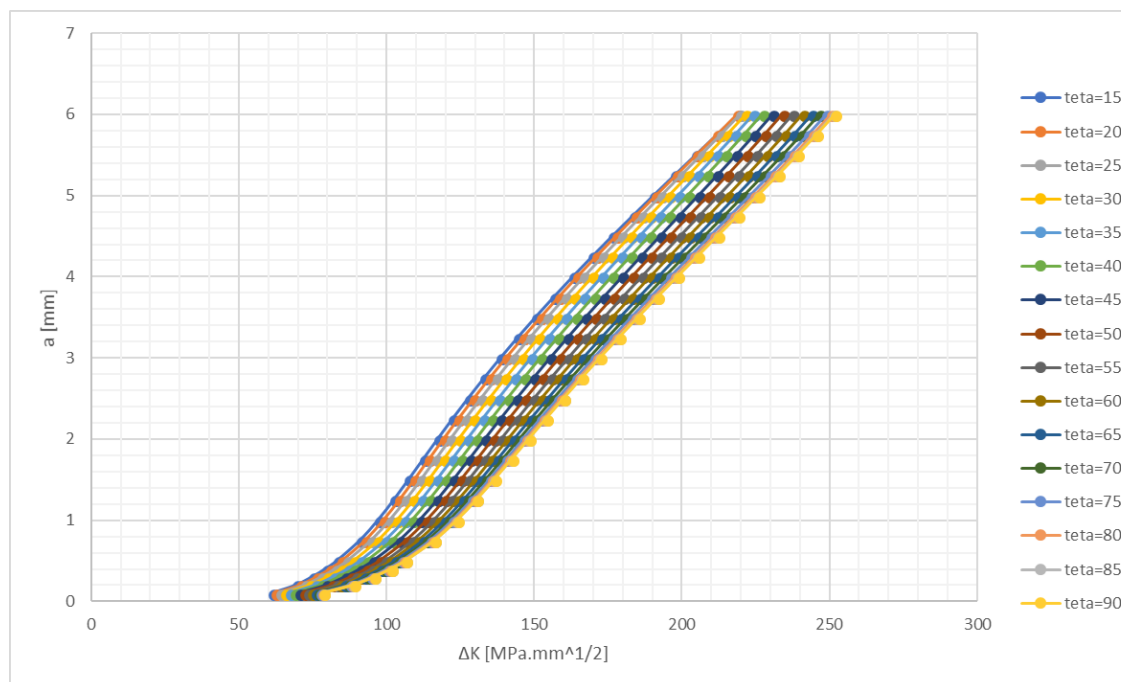
(b)



(c)



(d)

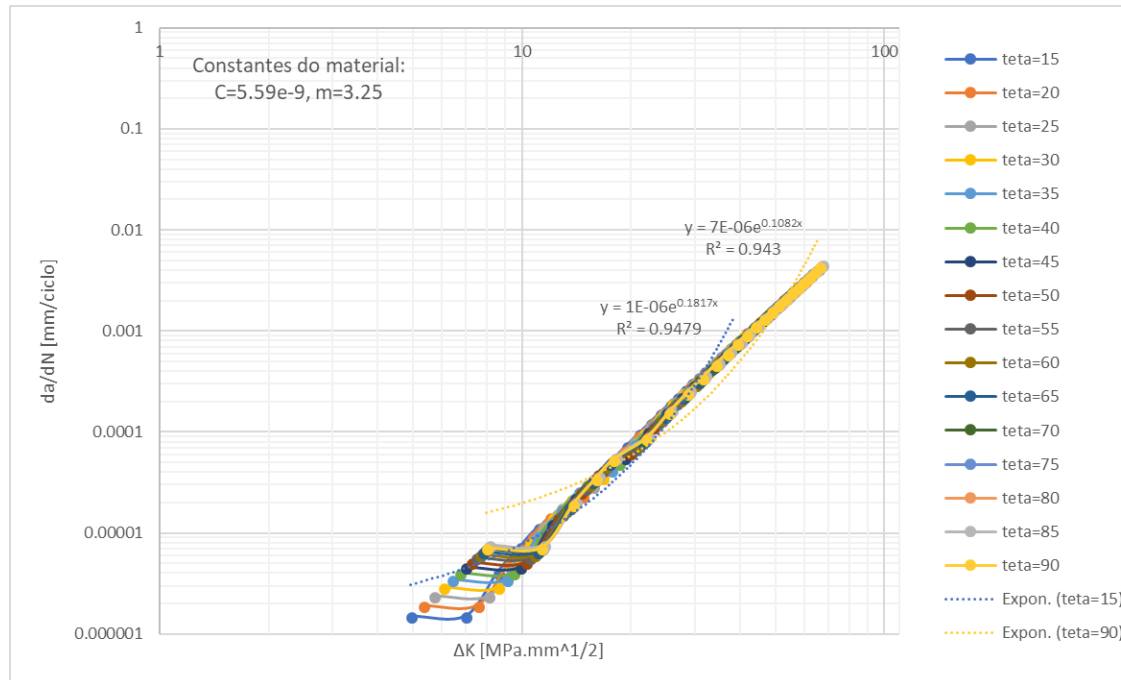


(e)

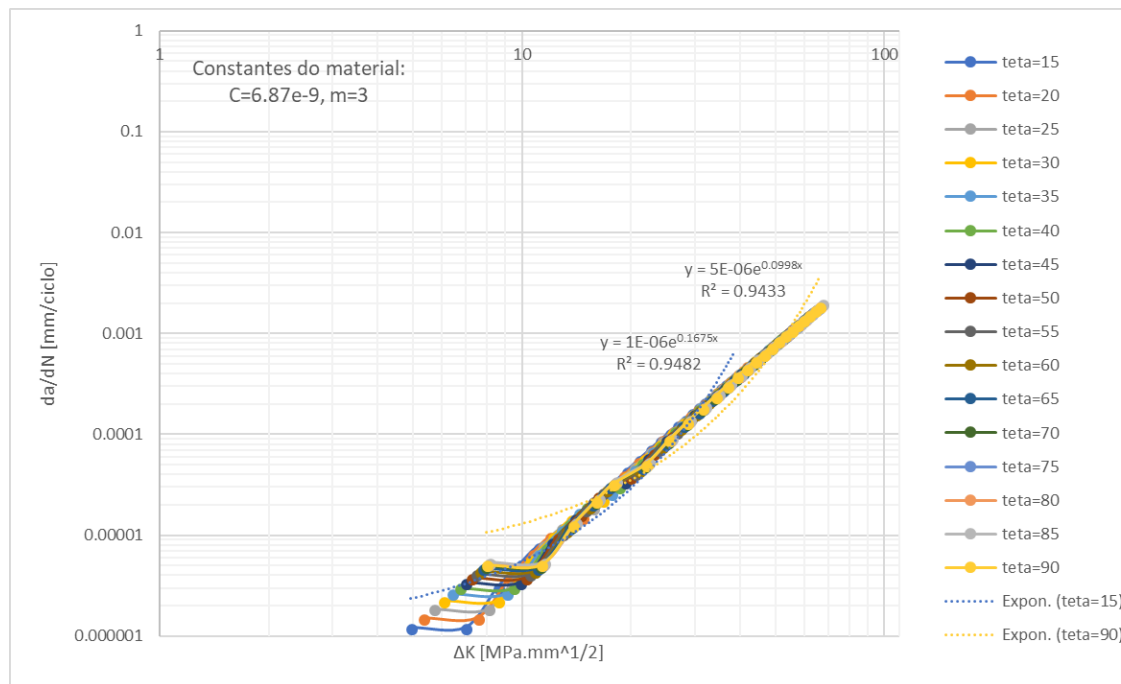
Figura B.2.4 – Gráficos do Conjunto B correspondentes ao ponto menos profundo de um defeito superficial no cordão de soldadura na zona central do corpo.

### B.2.5. Gráficos correspondentes a um defeito embebido na tampa

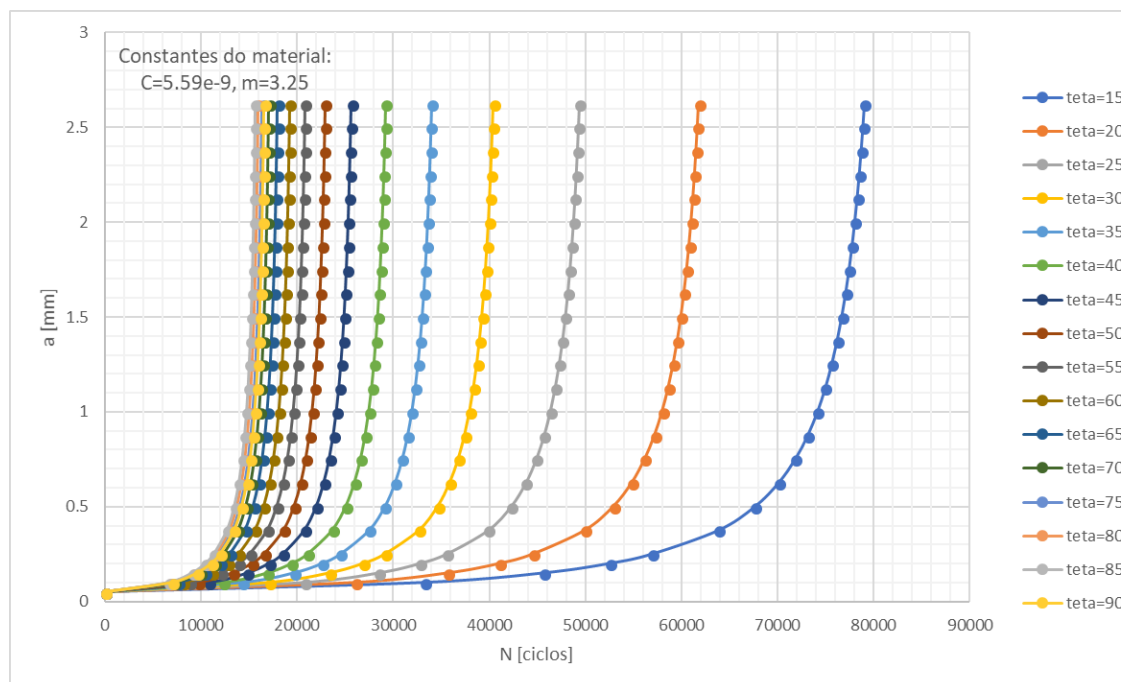
Neste anexo encontram-se gráficos, associados a um defeito elíptico embebido na tampa, descritivos da evolução da velocidade de propagação de fenda,  $da/dN$ , em função da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , em (a) e (b); gráficos que relacionam o número de ciclos efetuados,  $N$ , e o tamanho de fenda,  $a$ , em (c) e (d), para as constantes de material correspondentes a uma microestrutura austenítica e ferrítico-perlítica, respetivamente; e por último, um gráfico representativo da evolução de  $\Delta K$  em função de  $a$ , em (e).



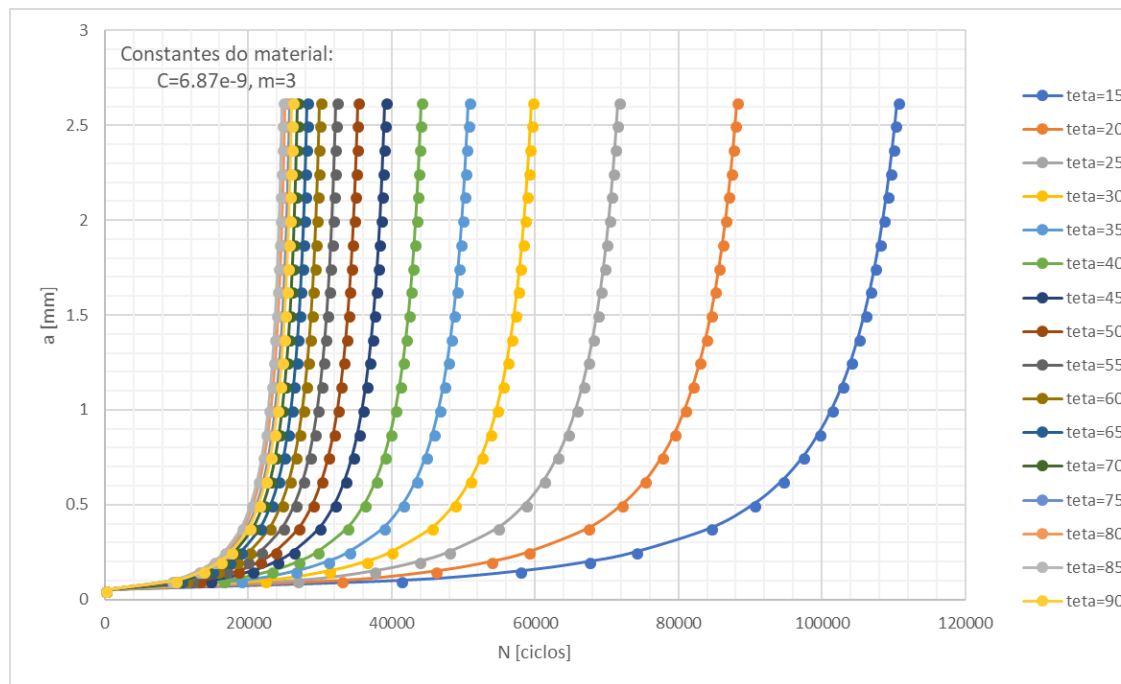
(a)



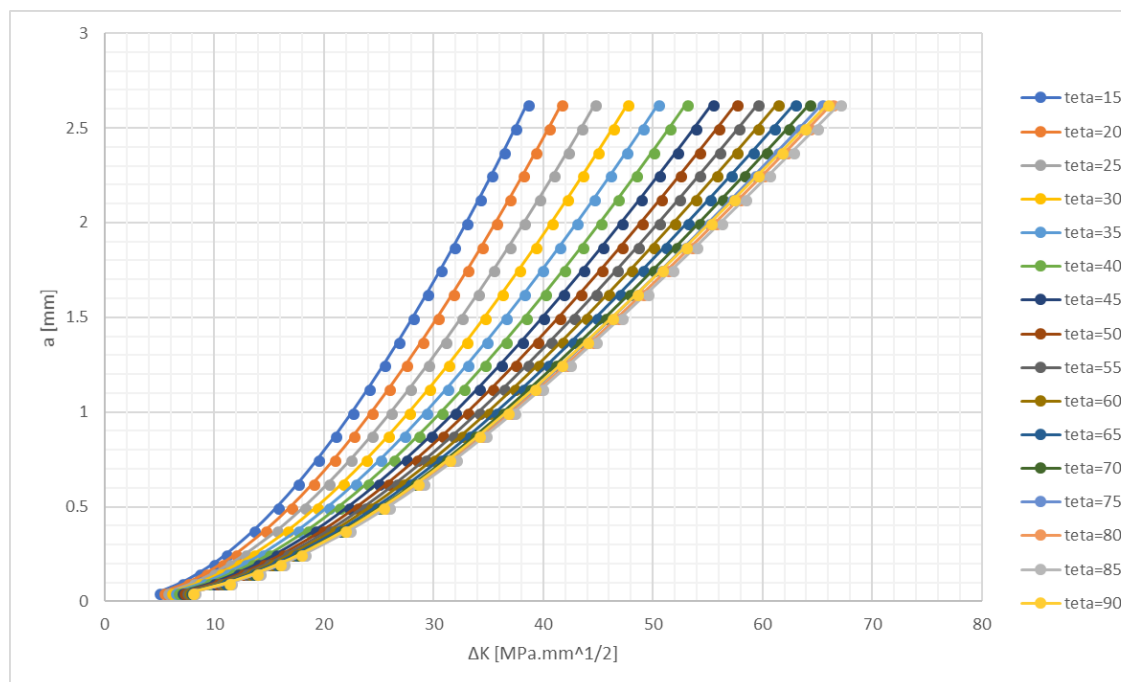
(b)



(c)



(d)

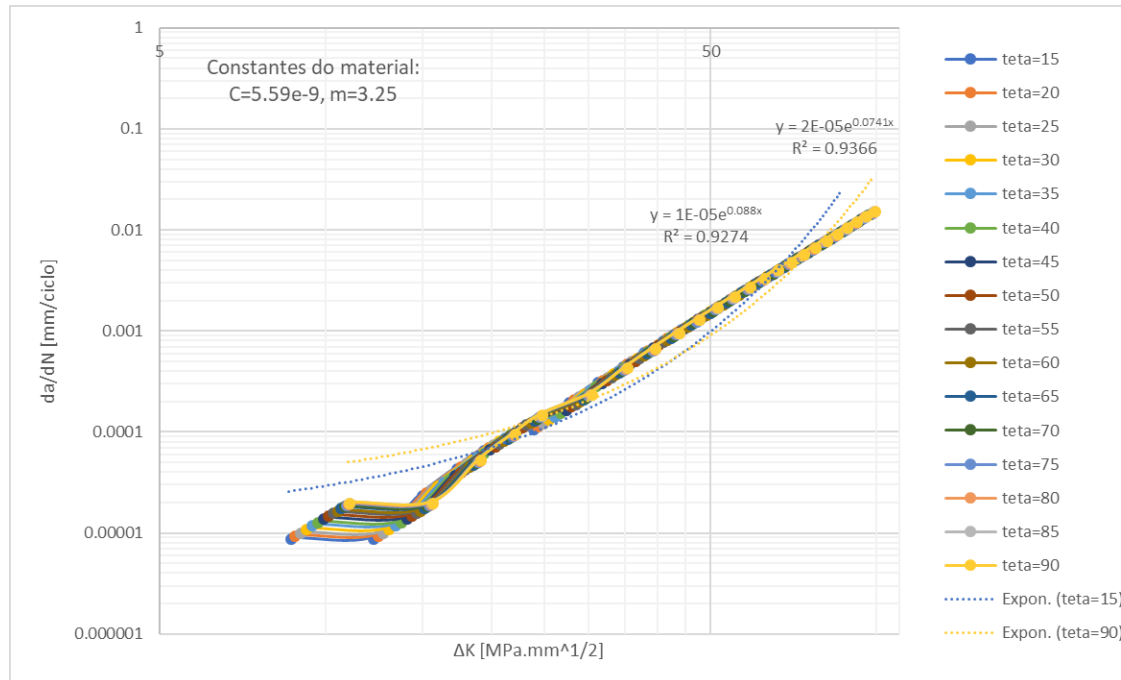


(e)

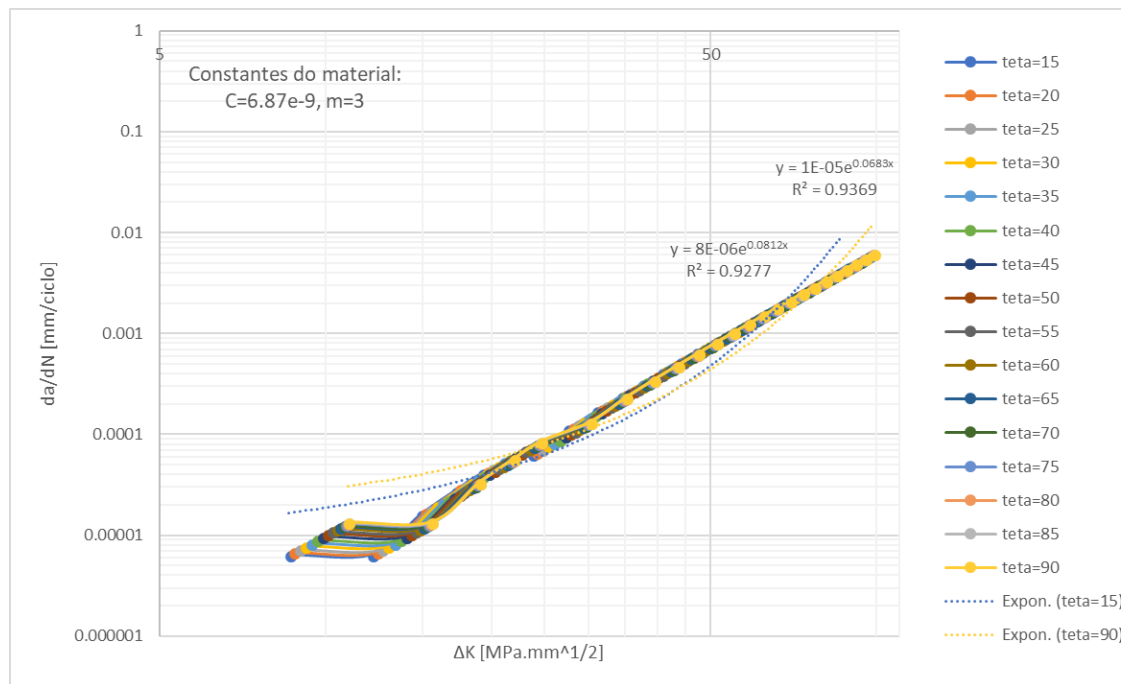
Figura B.2.5 – Gráficos do Conjunto B correspondentes a um defeito embebido na zona da tampa.

### B.2.6. Gráficos correspondentes a um defeito superficial na tampa

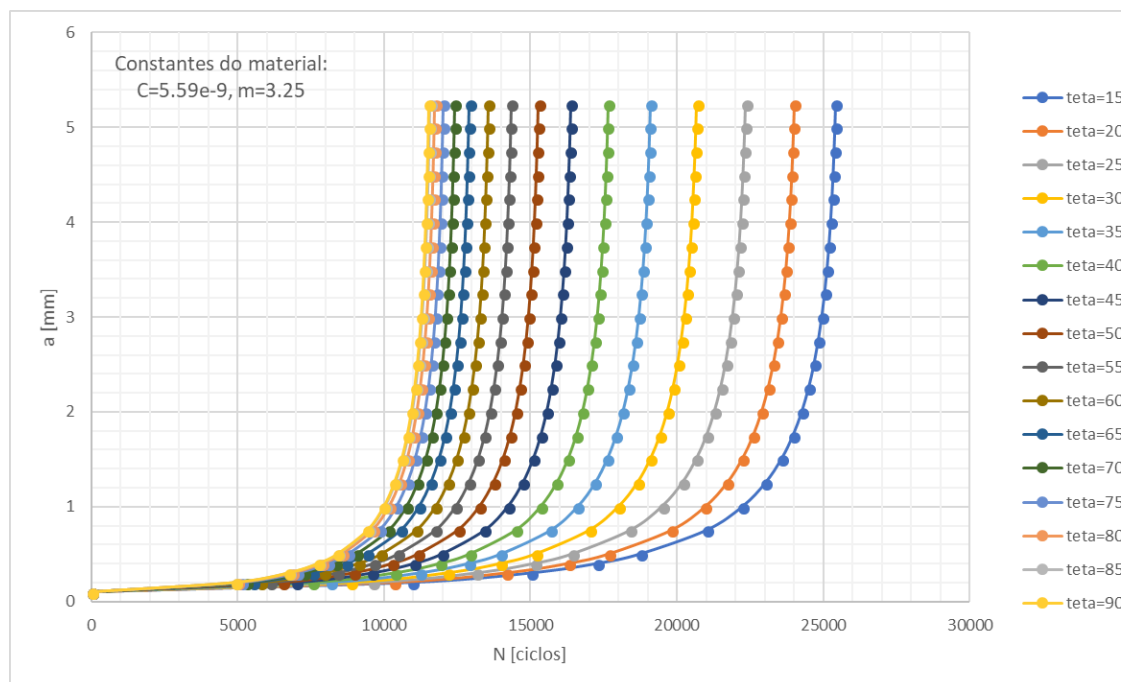
Neste anexo encontram-se gráficos, associados a um defeito semielíptico superficial na tampa, descritivos da evolução da velocidade de propagação de fenda,  $da/dN$ , em função da gama dos fatores de intensidade de tensões,  $\Delta K$ , em (a) e (b); gráficos que relacionam o número de ciclos efetuados,  $N$ , e o tamanho de fenda,  $a$ , em (c) e (d), para as constantes de material correspondentes a uma microestrutura austenítica e ferrítico-perlítica, respetivamente; e por último, um gráfico representativo da evolução de  $\Delta K$  em função de  $a$ , em (e).



(a)

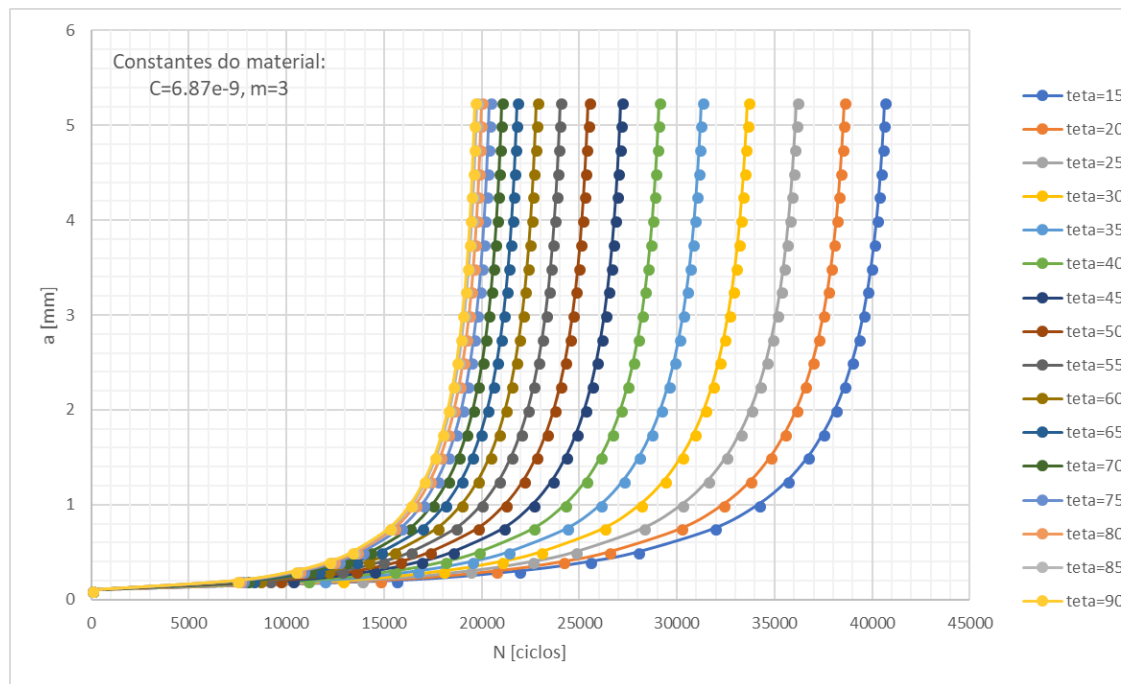


(b)

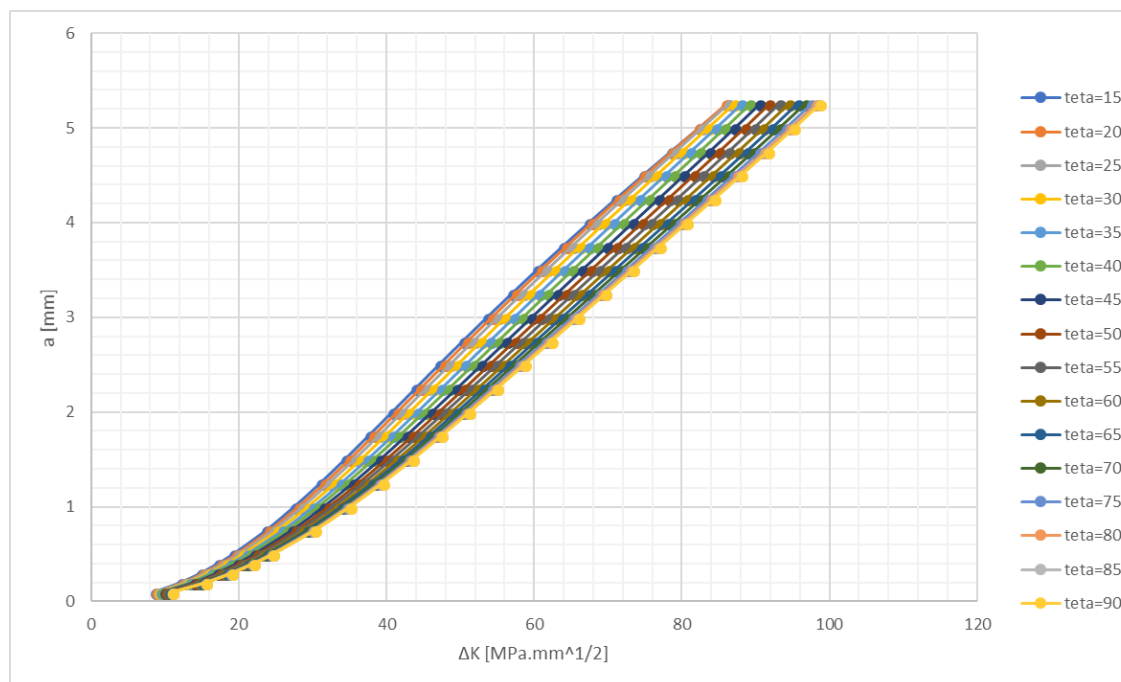


(c)





(d)



(e)

Figura B.2.6 – Gráficos do Conjunto B correspondentes a um defeito superficial na zona da tampa.